



IMPLEMENTAÇÃO DE ALGORITMOS BIO-ÓPTICOS REGIONAIS A PARTIR DE MEDIDAS RADIOMÉTRICAS COLETADAS *IN SITU*: BAÍA DE GUANABARA (RJ)

Alessandra Barbosa Filgueiras

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Orientador: Susana Beatriz Vinzón

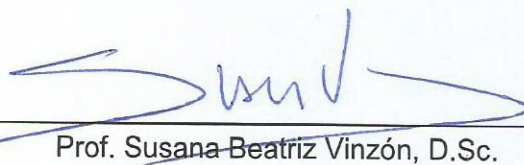
Rio de Janeiro
Julho de 2018

IMPLEMENTAÇÃO DE ALGORITMOS BIO-ÓPTICOS REGIONAIS A PARTIR DE
MEDIDAS RADIOMÉTRICAS COLETADAS *IN SITU*: BAÍA DE GUANABARA (RJ)

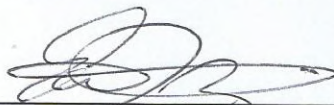
Alessandra Barbosa Filgueiras

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA OCEÂNICA.

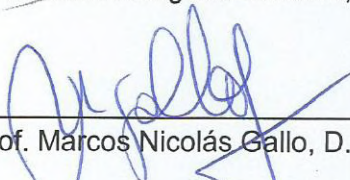
Examinada por:



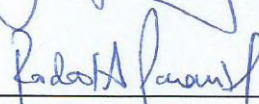
Prof. Susana Beatriz Vinzón, D.Sc.



Prof. Eduardo Negri de Oliveira, D.Sc.



Prof. Marcos Nicolás Gallo, D.Sc.



Prof. Rodolfo Pinheiro da Rocha Paranhos, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JULHO DE 2018

Filgueiras, Alessandra Barbosa

Implementação de Algoritmos Bio-Ópticos Regionais a partir de Medidas Radiométricas Coletadas *In Situ*: Baía de Guanabara (RJ) / Alessandra Barbosa Filgueiras. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

XVII, 67p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Susana Beatriz Vinzón

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Oceânica, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 59 - 68.

1. Medidas radiométricas. 2. Baía de Guanabara. 3. Algoritmos bio-ópticos. 4. Concentração de fitoplâncton I. Vinzón, Susana Beatriz. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, gostaria de agradecer aos meus pais, Fernando e Denise, por terem me dado suporte e incentivo ao estudo, que nunca mediram esforços quando o assunto era o meu desempenho acadêmico. Estudei nas melhores escolas, nas melhores faculdades, tive todo o tempo que precisei para me dedicar a estudar, mas principalmente, sempre fui instruída por eles da importância que o estudo teria em toda a minha trajetória. Pai, obrigada por estar do meu lado em tudo que eu faço, pelo carinho absoluto, pelas palavras de sabedoria, pelas conversas, pela cia e pelo amor incondicional. Mãe, obrigada por ser a voz da razão, pelo pé no chão e pelas formas estranhas que você encontra para demonstrar que está do meu lado sempre também.

Obrigada, Susana, minha orientadora. Sempre admirei sua calma e paciência para resolver os problemas, me identifiquei com seu jeito acolhedor quando cursei suas disciplinas. No final das contas resolvi executar um projeto que não é o tema mais significativo da sua linha de pesquisa, mas mesmo assim recebi seu apoio e fui indicada a ter um co-orientador. Mesmo com os puxões de orelha quando os prazos foram ficando curtos, com as reuniões cada vez mais escassas e com os meus problemas pessoais, tudo deu certo. Obrigada pela confiança e oportunidade no seu laboratório.

Eu conhecia o professor Eduardo Negri apenas de nome e sentia uma grande pena de não ter tido a oportunidade de conhecê-lo durante a minha graduação na faculdade. Mas nossos caminhos se cruzaram já na reta final do mestrado, quando, decidida a trabalhar com Sensoriamento Remoto, bati em sua porta pedindo ajuda em meu projeto. Depois de uma longa conversa, fui recebida com uma frase de motivação: “Temos pouco tempo para executar esse trabalho, mas eu estou precisando de um aluno no meu projeto e você está precisando de um professor, quer trabalhar intensamente?” Definitivamente dizer sim foi a melhor decisão que tomei. Obrigada ao meu co-orientador por ter me passado parte da sua sabedoria durante essa jornada, por me dizer em quase todos os nossos encontros e reuniões que tudo daria certo, por acreditar desde o início no nosso trabalho juntos, por falar sempre das suas experiências acadêmicas (para que eu me espelhasse, mesmo que você não soubesse como isso era importante pra mim) e, especialmente, por não ter descreditado no resultado em momento nenhum.

Quando temos as pessoas certas ao nosso lado, parece que nossos sonhos e conquistas são mais fáceis de serem alcançados. Principalmente porque além de te ajudar, elas não deixam você caminhar para trás. E eu sou afortunada por ter ao meu

lado um grande amigo e namorado, que me ajudou em todas as noites que eu tive que virar acordada trabalhando no projeto, que consertou inúmeras vezes o meu computador de tanto uso, que me acalmava quando eu me desesperava com os prazos e resultados e que confia tanto no meu potencial para fazer tudo da melhor forma, que não me deixa pensar nem por um minuto no contrário. Afonso, obrigada por todo o amor e tempo de dedicação.

Outras pessoas contribuíram de forma indireta, mas foram essenciais. Meninas, obrigada pela amizade que começou na infância, mas que perdurou todos esses anos; que é braço amigo e também bronca de mãe; que é intensa mesmo de longe; que entende o sumiço; que é igual mesmo depois de tanto tempo; que desce para o bar para uma risada em um dia estressante; que vem de longe porque estou precisando ou porque matar a saudade só por vídeo não é mais aceitável ou até mesmo que vem do prédio ao lado porque ser vizinha não é suficiente, tem que dormir comigo. Obrigada pela preocupação e carinho sinceros Linha, Ju, Paulinha, Mari e Lelê! Certamente teria sido mais difícil para mim (e para o Afonso) sem o apoio de vocês.

E por fim, muito obrigada Deus por todas as oportunidades que a vida me traz. Eu tento abraçar e seguir em frente diante de todas as portas abertas para o sucesso e sei que todos esses ensejos são obras suas. Obrigada por me mostrar que o caminho da fé sempre pode me ajudar, independentemente do tamanho do desafio.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

IMPLEMENTAÇÃO DE ALGORITMOS BIO-ÓPTICOS REGIONAIS A PARTIR DE
MEDIDAS RADIOMÉTRICAS COLETADAS *IN SITU*: BAÍA DE GUANABARA (RJ)

Alessandra Barbosa Filgueiras

Julho/2018

Orientador: Susana Beatriz Vinzón

Programa: Engenharia Oceânica

Diante da importância ambiental, econômica e social da Baía de Guanabara, localizada no Rio de Janeiro (RJ) e em vista da necessidade de um acompanhamento de poluição desta localidade, este estudo de caso tem como objetivo principal elaborar algoritmos empíricos regionais para o monitoramento das concentrações de fitoplâncton presentes nesta região estuarina. Devido à grande variabilidade espacial e temporal causada pelo padrão de circulação na localidade da Baía de Guanabara, foram necessários pontos de amostragem bem distribuídos para uma análise adequada da qualidade desta água. Dados radiométricos coletados *in situ*, processados e ajustados demonstraram a possibilidade da elaboração destes algoritmos bio-ópticos, por meio da identificação dos espectros que possuem assinaturas espectrais associadas à intensa floração fitoplanctônica e elevada concentração de matéria orgânica dissolvida.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

IMPLEMENTATION OF REGIONAL BIO-OPTICAL ALGORITHMS FROM
RADIOMETRIC MEASURES COLLECTED *IN SITU*: GUANABARA BAY (RJ)

Alessandra Barbosa Filgueiras

July/2018

Advisor: Susana Beatriz Vinzón

Department: Oceanic Engineering

Considering the environmental, economic and social importance of Guanabara Bay, located in Rio de Janeiro (RJ), the main objective of this case study is to elaborate regional empirical algorithms for the monitoring of phytoplankton concentrations present in this estuarine region. This may aid in the lack of pollution monitoring in this area. With the great spatial and temporal variability caused by the circulation pattern in the Guanabara Bay, many accurate sampling points were arranged for an adequate water quality analysis. The radiometric data collected *in situ*, processed and adjusted allowed the elaboration of these bio-optical algorithms, through the observation of a band that presented spectral signatures associated with the intense flowering of phytoplankton and the high concentration of dissolved organic matter.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	iv
SUMÁRIO	viii
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS.....	xiii
LISTA DE EQUAÇÕES.....	xiv
I. Introdução.....	1
II. Objetivos.....	4
II.1 Objetivos Específicos	4
III. Área de estudo.....	5
III.1 Características Gerais da Baía de Guanabara (BG)	5
III.2 Aspectos relevantes da área de estudo	7
III.3 Características oceanográficas.....	8
IV. Fundamentação Teórica.....	10
IV.1 Sensoriamento Remoto	10
IV.2 A Radiação Eletromagnética	12
IV.3 Grandezas Radiométricas.....	18
IV.4 Substância Opticamente Ativas.....	22
IV.5 Classificação e Algoritmos Bio-ópticos para Estimativas.....	26
V. Metodologia.....	29
V.1 Localização dos Pontos de Amostragem	29
V.2 Coletas de Dados Biogeoquímicos e Radiométricos	30
V.3 Concentração <i>In Situ</i> de Clorofila- <i>a</i>	31
V.4 Processamento dos dados Radiométricos, Filtragem e Normalização das Curvas de Reflectância de Sensoriamento Remoto.....	32
V.5 Classificação das Curvas Espectrais pelo Método Ward.....	34
V.6 Implementação dos Algoritmos Empíricos	35
V.6.1 Modelos OC3 e OC4	35
V.6.2 Modelo Fluorescence Line Height (FLH)	35
V.6.3 Modelo NIR-red (Nr)	35
V.6.4 Modelo Red-Green (RG)	36
V.6.5 Modelo Asynthetic chlorophyll index (SCI).....	37
V.6.6 Modelo NDCI.....	37
V.6.7 Modelo MaximumChlorophyll Index (MCI)	38

VI. Resultados e Discussão	39
VI.1 - Parâmetros Biogeoquímicos Coletados <i>In Situ</i>	39
VI.2 Tratamento dos Dados de Reflectância de Sensoriamento Remoto.....	43
VI.3 Classificação das Curvas Espectrais da Reflectância de Sensoriamento Remoto	45
VI.4 Algoritmos Bio-ópticos Empíricos.....	48
VI.4.1 Algoritmos OC3 e OC4.....	50
VI.4.2 Algoritmo FLH	51
VI.4.3 Algoritmos Nrs.....	51
VI.4.4 Algoritmo RG1.....	51
VI.4.5 Algoritmo SCI e NDCI.....	51
VI.4.6 Algoritmo MCI.....	52
VII.Conclusão	56
8. Referências Bibliográficas.....	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Baía de Guanabara, RJ, Brasil (Fonte: Google Maps).	6
Figura 2 – Bacias contribuintes da Baía de Guanabara (Fonte: PDBG, 1999).	7
Figura 3 – Definição das áreas da Baía de Guanabara, segundo Mayr <i>et al.</i> (1989) (Fonte: FISTAROL <i>et al.</i> , 2015).	8
Figura 4 – Cobertura do sensor MODIS a bordo do satélite AQUA. Imagem de 15 de fevereiro de 2011, mostrando parte da península da Coreia coberta por neve (Fonte: http://www.oeco.org.br/blogs/geonoticias).	11
Figura 5 – (E) Representação dos campos elétricos e (M) Representação dos campos magnéticos e (C) direção de propagação da radiação (Fonte: CCRS, 2016).	13
Figura 6 – Comprimento de onda da radiação (λ) (Fonte: CCRS, 2016).	14
Figura 7 – Quanto menor o comprimento de onda da radiação eletromagnética, mais alta a frequência e a energia associada à onda eletromagnética (Fonte: Adaptado de BAKKER <i>et al.</i> , 2009).	15
Figura 8 – O espectro eletromagnético (Fonte: Adaptado da Ilustração de Peter Hermes Furian - https://www.infoescola.com/fisica/espectro-eletromagnetico/).	16
Figura 9 – Definição de Ângulo Sólido (Ω). Área (A) determinada pela intersecção de um cone que tem seu vértice na origem de uma esfera de raio r (Fonte: Google Images).	19
Figura 10 – Reflectância, Transmitância e Absortância.	20
Figura 11 – Conceito de radiância com uma área-fonte projetada, em uma direção específica, e um ângulo sólido específico (Fonte: Adaptada de ALCÂNTARA, 2014).	21
Figura 12 – Radiômetros: equipamentos utilizados para medir a energia radiante (Fonte: http://www.seos-project.eu/modules/laser-rs/laser-rs-c03-s03-p01.html).	22

Figura 13 – Imagem de 06 de maio de 2005 do sensor MODIS a bordo do satélite AQUA (Fonte: KAMPEL et al., 2007).	24
Figura 14 – Tipos de corpos aquáticos com diferentes concentrações das principais substâncias opticamente ativas (fitoplâncton, material particulado em suspensão e material dissolvido em suspensão) (Fonte: Google Images).	24
Figura 15 – Profundidade de penetração da radiação eletromagnética na água ($300 \text{ nm} \leq \lambda \leq 800 \text{ nm}$). Onde: UV é ultravioleta, VI violeta, AZ azul, VE verde, AM amarelo, LA laranja, VE vermelho, IR infravermelho (Fonte: Adaptada de http://ksuweb.kennesaw.edu/~jdirnber/BioOceanography/Lectures)	25
Figura 16 – Espectro de reflectância da água pura (linhas tracejadas) e espectro de reflectância da água em função do aumento das concentrações ($\mu\text{g/L}$, mg/L) das principais substâncias opticamente ativas (linhas contínuas) (Fonte: Adaptado de JENSEN, 2009).	26
Figura 17 – Espectros de R_{rs} (sr^{-1}) pelo comprimento de onda (nm), para águas Caso 1 e 2 com diferentes concentrações dos constituintes. Espectros (a), (b), (c) e (e): Caso 2. Espectros (d) e (f): Caso 1 (Fonte: IOCCG, 2000).	28
Figura 18 – Pontos de coleta na Baía de Guanabara.	30
Figura 19 – Modelo de medidas radiométricas coletadas na região de estudo.	31
Figura 20 – Medidas da radiância da Placa, do Céu e da Água.	33
Figura 21 – Espectro de Reflectância (R_{rs}).	33
Figura 22 – Histograma da Concentração de Clorofila-a.	39
Figura 23 – Histograma da concentração de clorofila-a em cada ponto de coleta.	41
Figura 24 – Gráficos de dispersão da temperatura, profundidade de <i>Secchi</i> e concentração de clorofila-a. Na legenda é possível observar os valores médios da temperatura e do <i>Secchi</i> para cada um dos pontos amostrais.	42

Figura 25 – Reflectância de Sensoriamento Remoto (R_{rs}).	43
Figura 26 – Reflectância (R_{rs}) filtrada e normalizada.	43
Figura 27 – Reflectância (R_{rs}) filtrada/normalizada e reduzida às bandas do sensor OLCI/Sentinel-3. As barras verdes verticais ressaltam exclusivamente as bandas do OLCI centradas nas regiões espectrais do vermelho e infravermelho próximo.	44
Figura 28 – Reflectância (R_{rs}) filtrada e normalizada para cada ponto de coleta.	45
Figura 29 – Avaliação do número de classes (ou clusters) necessário para classificação das curvas espectrais de reflectância de sensoriamento remoto.	46
Figura 30 – Classificação das curvas de reflectância de sensoriamento remoto em classes. \bar{i} = média de cada classe espectral identificada.	47
Figura 31 – Gráficos de Dispersão da Clorofila <i>versus</i> Razão de Bandas. São consideradas todas as curvas espectrais.	49
Figura 32 – Gráficos de Dispersão da Clorofila <i>versus</i> a Razão de Bandas. São consideradas todas as curvas espectrais.	50
Figura 33 – Gráficos de Dispersão da Clorofila <i>versus</i> a Razão de Bandas ($Nr2$ e $Nr1-IR$) considerando todas as classes espectrais (a e b); todas as classes menos a Classe 1 (c e d); a Classe 1 (e e f).	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais regiões espectrais utilizadas para o sensoriamento remoto da superfície terrestre (Fonte: Adaptado de CHEN, 1985).	17
Tabela 2 – Localização dos Pontos de Amostragem na BG.....	29
Tabela 3 – Correlações entre as Concentrações de Clorofila-a e os Algoritmos Bio- ópticos.	48

LISTA DE EQUAÇÕES

$$c = \lambda \cdot \nu \quad (4.1)$$

Onde, c = velocidade da luz (3×10^8 m/s)

λ = comprimento de onda (m)

ν = frequência (ciclos por segundo, Hz)

$$Q = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda} \quad (4.2)$$

Onde, Q = energia da onda eletromagnética (J = joule)

$h = 6,6262 \cdot 10^{-34}$ J.s (constante de Planck)

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \quad (4.3)$$

Onde, Ω = ângulo sólido

$A = 4\pi r^2$ (área de uma esfera)

r = raio

$$\Phi_{\text{incidente}} = \Phi_{\text{refletido}} + \Phi_{\text{absorvido}} + \Phi_{\text{transmitido}} \quad (4.4)$$

Onde, Φ = fluxo

$$\rho = \frac{\Phi_{\text{refletido}}}{\Phi_{\text{incidente}}} \quad (4.5)$$

Onde, ρ = Reflectância

$$\tau = \frac{\Phi_{\text{transmitido}}}{\Phi_{\text{incidente}}} \quad (4.6)$$

Onde, τ = Transmitância

$$\alpha = \frac{\Phi_{\text{absorvido}}}{\Phi_{\text{incidente}}} \quad (4.7)$$

Onde, α = Absortância

$$E = \frac{\Phi}{A} \quad (4.8)$$

Onde, E = Irradiância

$$L = \frac{\Phi}{\Omega} \cdot \frac{1}{A \cdot \cos(\theta)} \quad (4.9)$$

Onde, $I = \Phi \Omega$ = intensidade radiante ($W \cdot sr^{-1}$),

Φ = fluxo radiante (W),

Ω = ângulo sólido,

A = área-fonte (da qual o fluxo radioativo emerge),

θ = ângulo de inclinação entre o vetor normal à superfície da área-fonte e a direção do ângulo sólido.

L = radiância ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$).

$$R_{rs} = \frac{L_{water} - 0,024 \cdot L_{sky} \cdot P_{plate}}{L_{plate} \cdot \pi} \quad (5.4.1)$$

Onde, R_{rs} = reflectância calculada

L_{sky} = radiância proveniente do céu

L_{water} = radiância proveniente da água

L_{plate} = radiância proveniente da placa

P_{plate} = fator de calibração da placa

$$OC3 = \frac{\max[R_{rs}(442), R_{rs}(489)]}{R_{rs}(559)} \quad (5.6.1)$$

$$OC4 = \frac{\max[R_{rs}(442), R_{rs}(489), R_{rs}(559)]}{R_{rs}(559)} \quad (5.6.2)$$

$$FLH = R_{rs}(680) - \left[R_{rs}(665) + ((R_{rs}(708) - R_{rs}(665)) * \frac{(680-665)}{(708-665)}) \right] \quad (5.6.3)$$

$$Nr1 = \frac{R_{rs}(708)}{R_{rs}(665)} \quad (5.6.4)$$

$$Nr1_OLCI = \frac{R_{rs}(665) + R_{rs}(673)}{R_{rs}(681) + R_{rs}(708)} \quad (5.6.5)$$

$$\mathbf{Nr1_IR} = \frac{R_{rs}(708)}{R_{rs}(753)} \quad (5.6.6)$$

$$\mathbf{Nr1_x} = \frac{R_{rs}(708) + R_{rs}(681)}{R_{rs}(665)} \quad (5.6.7)$$

$$\mathbf{Nr2} = \left[\frac{1}{R_{rs}(665)} - \frac{1}{R_{rs}(708)} \right] * R_{rs}(753) \quad (5.6.8)$$

$$\mathbf{Nr2_OLCI} = [R_{rs}(665) + R_{rs}(673)]^{-1} - [R_{rs}(681) + R_{rs}(708)]^{-1} * R_{rs}(753) \quad (5.6.9)$$

$$\mathbf{Nr2_OLCI1} = [R_{rs}(665)]^{-1} - \max[R_{rs}(708), R_{rs}(681)]^{-1} * R_{rs}(753) \quad (5.6.10)$$

$$\mathbf{Nr2_OLCI2} = [R_{rs}(665)]^{-1} - [R_{rs}(681) + R_{rs}(708)]^{-1} * R_{rs}(753) \quad (5.6.11)$$

$$\mathbf{Nr2_OLCI3} = \frac{[R_{rs}(665) + R_{rs}(673)]}{[R_{rs}(681) + R_{rs}(708) + R_{rs}(753)]} \quad (5.6.12)$$

$$\mathbf{Nr3} = \left[\frac{1}{R_{rs}(665)} - \frac{1}{R_{rs}(680)} \right] * R_{rs}(708) \quad (5.6.13)$$

$$\mathbf{Nr4} = \frac{[R_{rs}(665)^{-1} - R_{rs}(680)^{-1}]}{[R_{rs}(708)^{-1} - R_{rs}(680)^{-1}]} \quad (5.6.14)$$

$$\mathbf{Nr_OLCI1} = \frac{\max[R_{rs}(680), R_{rs}(708)]}{\min[R_{rs}(665), R_{rs}(673)]} \quad (5.6.15)$$

$$\mathbf{Nr_BAND4_Le} = \frac{[R_{rs}(665)^{-1} - R_{rs}(673)^{-1}]}{[R_{rs}(753)^{-1} - R_{rs}(708)^{-1}]} \quad (5.6.16)$$

$$\mathbf{RG1} = \frac{\max[R_{rs}(680), R_{rs}(708)]}{R_{rs}(560)} \quad (5.6.17)$$

$$\mathbf{SCI_Hchl} = R_{rs}(680) + \left[\frac{(680-665)}{(680-620)} \right] * [(R_{rs}(620) - R_{rs}(680)) - R_{rs} \quad (5.6.18)$$

$$\text{SCI_Hdelta} = R_{rs}(620) - [R_{rs}(680) + \left[\frac{(680-620)}{(680-560)} \right] * [(R_{rs}(560) - R_{rs}(680))]$$

(5.6.19)

$$\text{SCI_Shen} = \text{SCI_Hchl} - \text{SCI_Hdelta}$$

(5.6.20)

$$\text{SCI_Hchl} = [R_{rs}(708) + \frac{(708-673)}{(708-640)} * (R_{rs}(640) - R_{rs}(708))] - R_{rs}(673)$$

(5.6.21)

$$\text{SCI_Hdelta} = R_{rs}(640) - [R_{rs}(708) + \frac{(708-640)}{(708-560)} * (R_{rs}(560) - R_{rs}(708))]$$

(5.6.22)

$$\text{SCI_Zhang} = \text{SCI_Hchl} - \text{SCI_Hdelta}$$

(5.6.23)

$$\text{NDCI} = \frac{R_{rs}(708) - R_{rs}(680)}{R_{rs}(708) + R_{rs}(680)}$$

(5.4.24)

$$\text{NDCI}_1 = \frac{R_{rs}(680) - R_{rs}(665)}{R_{rs}(680) + R_{rs}(665)}$$

(5.4.25)

$$\text{MCI_Gower} = R_{rs}(708) - R_{rs}(680) - \frac{(708-680)}{(753-680)} * (R_{rs}(753) - R_{rs}(680))$$

(5.6.26)

I. Introdução

De acordo com a interpretação da Constituição Brasileira de 1988, em seu artigo 225, a proteção do planeta Terra depende especialmente das convicções do ser humano que o habitam e do seu compromisso em defender seus princípios, contando com o apoio e a influência das ações governamentais. A legislação federal de recursos hídricos institui que os mares territoriais, incluindo os golfos, as baías, as enseadas e os portos, pertencem às águas públicas de uso comum (CIDS, 2000).

Nesse contexto, a poluição ambiental, em especial a poluição marinha, é hoje um dos fatores mais graves de agressão ao meio ambiente. O aumento da população global, com acentuada tendência de ocupação das regiões litorâneas, tem comprometido a qualidade dos corpos aquáticos marinhos e continentais (GEOBRASIL, 2002). Diferente dos ambientes continentais, onde as mudanças são relativamente mais lentas, os ambientes aquáticos possuem uma dinâmica mais acentuada. A maior parte da poluição marinha é de origem terrestre e abrange os subprodutos de indústrias, águas contaminadas (pesticidas, herbicidas, produtos petroquímicos, efluentes). Essas substâncias entram no mar através dos rios, chuvas e ventos, sendo fontes permanentes de preocupação e busca de técnicas mais eficientes para a prevenção e o controle da poluição (MONTEIRO, 2003).

A clorofila-a (Chl-a) ($\mu\text{g/l}$) é um pigmento fotossintetizante imprescindível encontrado nos produtores primários. Sua concentração na água é muito utilizada como indicador do estado trófico da mesma, auxiliando também em estudos de poluentes aquáticos, sendo mais um parâmetro para comparação, pois em ambientes com grande disponibilidade de nutrientes, geralmente ocasionado pela emissão de esgotos domésticos, normalmente há maior proliferação de microrganismos, mas que ora são limitados pela quantidade de oxigênio, ora pela quantidade de luz disponível. Esse pigmento possui picos específicos de absorção da luz visível na faixa do azul e do vermelho (BROWN *et al.*, 1985), mas que podem ser mascarados quando estão presentes sedimentos em suspensão ou matéria orgânica dissolvida nesta água.

Uma grande preocupação mundial, atualmente, é o estado do ambiente marinho, especialmente as águas costeiras. A zona costeira tem um elevado valor ecológico, social e econômico. Dentre os sistemas costeiros, os estuários têm uma importância ainda maior por se tratarem de focos de atividade humana. As diversas formas de poluição são facilmente transportadas para os estuários devido às características hidrodinâmicas e turbulentas do mesmo, importando um risco maior à saúde pública e ao equilíbrio do meio ambiente aquático (COSTA, 2015).

No Brasil, entre os sistemas estuarinos, pode-se citar a Baía de Guanabara. Esta se trata de um estuário altamente complexo em termos de poluentes e constituintes. Como consequência de sua poluição, há perda expressiva da qualidade de suas águas e redução de vidas em seu interior (COSTA, 2014).

Estuários são geridos por processos hidrográficos com origens fluviais e marinhas (enchentes e marés, respectivamente); costumam apresentar morfologia semifechada; tendem a ser sistemas amplos e de alta circulação; distinguem claramente habitats à medida que se distancia do mar em direção aos rios; oferecem, usualmente, variação de profundidade, salinidade e aeração. Devido a essas características, o gerenciamento de estuários requer uma capacidade de se determinar os efeitos da circulação estuarina nas concentrações de constituintes resultantes de um evento específico. Por exemplo, florações de algas nocivas nos ambientes aquáticos podem ocorrer em questão de dias, com consequências muitas vezes fatais para outros organismos ou mesmo para o ser humano (NASSER, 2001).

Nesse sentido, o sensoriamento remoto tem se mostrado uma ferramenta eficiente para o monitoramento dos corpos aquáticos naturais por trazer amplas informações de natureza espacial e temporal aplicada ao entendimento da variabilidade desses vetores nos parâmetros de qualidade de água.

De acordo com a classificação introduzida por MOREL & PRIEUR (1977), as águas do oceano são divididas nas águas do Caso 1 e Caso 2. As águas do caso 1 são aquelas em que a cor do oceano depende principalmente da biomassa do fitoplâncton e pode ser descrita em termos das concentrações de clorofila-*a* (Chl-*a*). Neste caso, os algoritmos que utilizam as bandas centradas na região entre o azul e o verde do espectro eletromagnético são aplicados com sucesso na estimativa. Entretanto, esses algoritmos não são adequados para as águas do Caso 2, encontradas normalmente em regiões costeiras, onde outros constituintes opticamente ativos (como matéria orgânica dissolvida colorida (CDOM), partículas inorgânicas e detritos) são detectados. Consequentemente, a estimativa de Chl-*a* como índice de biomassa do fitoplâncton em águas de complexidade óptica é um pouco mais abstrusa.

A proposta deste estudo reside na utilização de uma base expressiva de dados radiométricos coletados *in situ* na região da Baía de Guanabara em concomitância com coletas de dados e análises biogeofísicas de amostras de água. A relevância desta pesquisa consiste em discernir os comprimentos de onda mais indicados para a elaboração de algoritmos bio-ópticos regionais para estimativa da concentração fitoplanctônica na Baía de Guanabara.

O presente estudo destaca os seguintes aspectos:

- Capítulo II: Objetivos gerais e específicos deste trabalho.
- Capítulo III: Caracterização mais detalhada da área de estudo, localizada na Baía de Guanabara, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Capítulo IV: Fundamentação teórica, que apresenta uma visão geral sobre o sensoriamento remoto; qual o papel da radiação eletromagnética nas análises feitas remotamente; quais as principais grandezas radiométricas necessárias para o entendimento deste trabalho; quais são as substâncias opticamente ativas e o detalhamento daquela analisada por esse estudo de caso; como e porque é feita a classificação de algoritmos bio-ópticos para estimativas e quais são eles.
- Capítulo V: Metodologia, que aborda como foram realizadas as coletas de dados biogeofísicos e radiométricos, bem como o processamento dos dados, a classificação das curvas espectrais e a utilização dos algoritmos empíricos para obtenção dos melhores resultados possíveis.
- Capítulo VI: Apresenta e discute os resultados gerais do trabalho, analisando detalhadamente cada etapa deste estudo e os dados nele obtidos.
- Capítulo VII: Conclui o trabalho, fazendo uma síntese geral, levando em consideração os aspectos mais relevantes, criticando possíveis mudanças e sugerindo melhoras para estudos posteriores.
- Capítulo VIII: Enumeração de todo o referencial teórico utilizado na elaboração, desenvolvimento e finalização deste estudo.

II. Objetivos

Elaborar algoritmos empíricos regionais para o monitoramento do estado trófico, através das concentrações de fitoplâncton, na região estuarina da Baía de Guanabara.

II.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

1. Avaliar a variabilidade temporal e espacial das concentrações de clorofila e demais parâmetros biogeofísicos (profundidade de *Secchi* e temperatura) na Baía de Guanabara (BG);
2. Organizar e processar uma base de dados radiométricos coleta *in situ* na região da BG;
3. Determinar os algoritmos bio-ópticos em função dos coeficientes de correlação determinados nas regressões.

III. Área de estudo

III.1 Características Gerais da Baía de Guanabara (BG)

O sistema estuarino da Baía de Guanabara (BG) está localizado entre os paralelos de 22°24' e 22°57' de latitude sul e os meridianos de 42°33' e 43°19' W. Possui uma forma irregular alongando-se no sentido dos meridianos e estreitando-se no sentido dos paralelos. Em função de sua localização geográfica, a BG está inteiramente compreendida na área intertropical. Em decorrência, possui um clima quente e chuvoso tipicamente tropical, responsável pela existência da mata Atlântica (CIDS, 2000).

O complexo hidrográfico que forma a BG está localizado no centro da região metropolitana do estado do Rio de Janeiro, Brasil (Fig. 1), apresenta uma área de 346 km², incluindo 59 km² de ilhas, seu volume médio é estimado em 2.200 milhões m³, a profundidade média é de 7,7 m, enquanto o perímetro é de 131 km, formada por 24 sub-bacias (NASSER, 2001).

A bacia hidrográfica tributária, onde a BG está inserida, abrange uma área de 4.600 km². Cerca de 35 rios deságuam na baía, com alta contribuição de efluentes domésticos brutos ou parcialmente tratados de 7,6 milhões de habitantes e efluentes industriais de mais de 10.000 indústrias (FEEMA, 1998). A bacia engloba 15 municípios, sendo 9 integralmente (Duque de Caxias, São João de Meriti, Belford Roxo, Nilópolis, São Gonçalo, Magé, Guapimirim, Itaboraí e Tanguá) e 6 parcialmente (Rio de Janeiro, Niterói, Nova Iguaçu, Cachoeiras de Macacu, Rio Bonito e Petrópolis) (NASSER, 2001).

A densidade populacional é alta na parte oeste da bacia, atingindo aproximadamente seis milhões de pessoas, o que representa cerca de 78% da população total da bacia, onde a contribuição de efluentes domésticos e industriais é alta, com uma pequena parcela de esgotos municipais tratados (NASSER, 2001).

Além dos impactos da poluição provenientes do crescimento populacional e industrial, também há uma preocupação específica com as questões ambientais de ordem física: destruição dos ecossistemas; aterros da baía, uso do solo, desencadeando em ocorrências de assoreamento, sedimentação de fundo, inundações e deslizamentos. Também são observados sérios danos à saúde pública na região devido à ausência de adequada gestão de esgotos sanitários e dos resíduos sólidos urbanos (FEEMA, 1998).



Figura 1 – Baía de Guanabara, RJ, Brasil (Fonte: Google Maps).

Com relação ao lixo doméstico, cerca de 8,5 toneladas são lançadas às margens da baía, com a liberação de cerca de 800 litros/dia de chorume. O aterro sanitário de Duque de Caxias absorve em média 5.500 toneladas/dia de lixo, enquanto o aterro de São Gonçalo chega a receber em torno de 700 toneladas/dia. Também são jogados todos os tipos de detritos diretamente nos rios que desembocam na baía de Guanabara (NASSER, 2001).

A poluição por óleo é uma das formas mais frequentes de contaminação das águas da BG. São lançadas diariamente, em média, 7 toneladas de óleo na baía, prejudicando especialmente a pesca de subsistência (FEEMA, 1998).

A descarga fluvial na BG é modesta, aproximadamente 100 m³/s (KJERFVE *et al.*, 1997), e os tributários fluviais (Fig. 2) geralmente possuem alta carga de poluentes, regulando de maneira significativa a qualidade da água nas regiões marginais da Baía de Guanabara (PDBG, 1999).

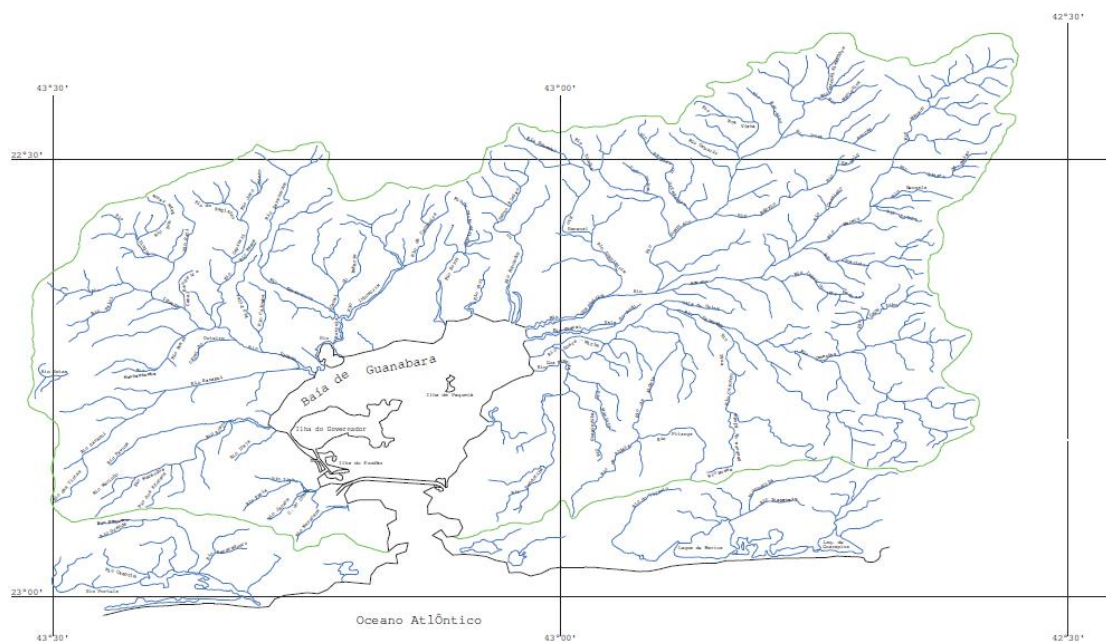


Figura 2 – Bacias contribuintes da Baía de Guanabara (Fonte: PDBG, 1999).

III.2 Aspectos relevantes da área de estudo

A BG foi dividida de acordo com suas características hidrológicas e oceanográficas em cinco regiões bem distintas, com vários níveis de qualidade da água (MAYR *et al.*, 1989): região 1: melhores condições de qualidade da água; região 2: áreas com alta circulação, mas sujeitas a alta carga orgânica; região 3: áreas deterioradas sob forte influência de contaminantes urbanos e industriais; região 4: áreas sob influência de rios menos poluídos e que ainda mantêm a orla do mangue; região 5: as áreas mais deterioradas com baixa circulação e alta entrada de contaminantes. Todas essas regiões podem ser observadas na figura 3.

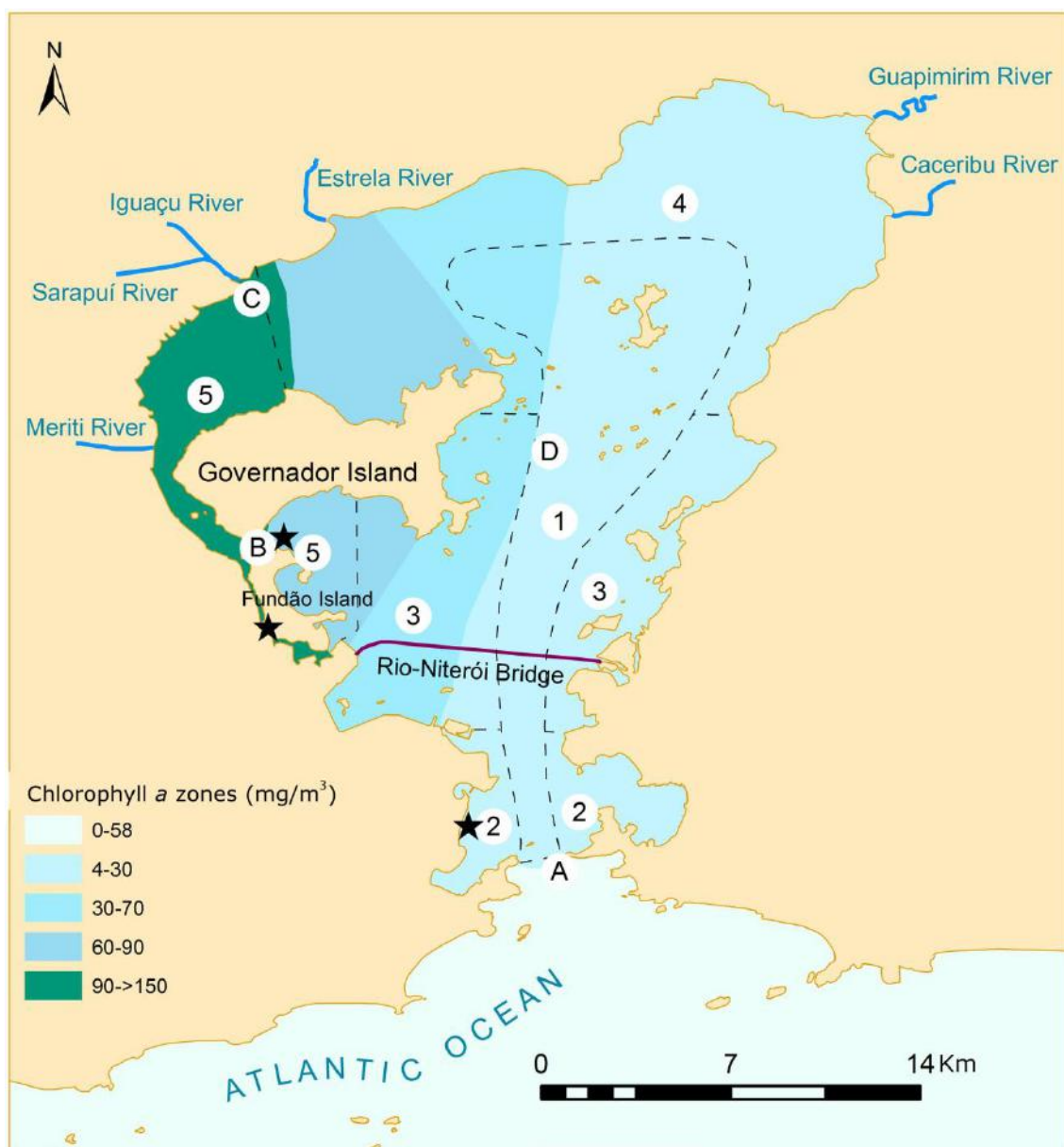


Figura 3 – Definição das áreas da Baía de Guanabara, segundo Mayr *et al.* (1989) (Fonte: FISTAROL *et al.*, 2015).

Os gradientes de qualidade da água na baía são controlados principalmente pelas mudanças sazonais entre os períodos chuvoso e seco; pela descarga de contaminantes e pela circulação e influência da água do mar, que tem maior influência no sul e partes sudeste da baía e é principalmente controlada pelas marés (MAYR *et al.*, 1989). As áreas com qualidade de água mais baixas encontram-se nas partes norte e noroeste da baía, onde duas características interagem para agravar o problema: é a região que recebe maior descarga de esgoto e a que tem menor

circulação de água. Nas áreas onde a diluição pela água do mar é maior, a qualidade da água é significativamente melhor (FISTAROL *et al*, 2015).

Uma característica extremamente importante da BG é o seu canal central, região onde existem as maiores profundidades na baía e por onde a água costeira consegue adentrar, contribuindo e determinando de forma efetiva os padrões de circulação observados e as condições ambientais da baía (NASSER, 2001).

A primeira indicação dos impactos da poluição na baía é a baixa transparência da água (MAYR *et al.*, 1989). No geral, os locais mais internos são caracterizados por baixa salinidade, altas concentrações de nutrientes e, frequentemente, baixos níveis de oxigênio dissolvido como resultado do processo de eutrofização. As águas mais externas apresentam menores concentrações de nutrientes e maiores níveis de salinidade e oxigênio dissolvido (FISTAROL *et al*, 2015).

III.3 Características oceanográficas

Quanto ao modo de formação da bacia, Pritchard (1967) classificou a BG como um vale de rios afogados. Estes são estuários em que suas bacias se formaram através de erosão fluvial e que ainda conservam seus traços dominantes. Geralmente possuem seção em forma de U, são rasos, com declividades suaves e profundidades que aumentam gradativamente em direção à desembocadura.

Outro critério utilizado para classificar os estuários foi utilizado por Schubel (1971), de acordo com o mecanismo de movimento dominante dos mesmos. Dessa maneira, a BG é um estuário dominado por marés, já que a movimentação da água é predominantemente ocasionada pelas oscilações de marés. Sua maré é semidiurna com amplitude média de 0,8 m e a entrada de rios representam aproximadamente 100 m³/s.

Essas propriedades, associadas às correntes locais, promovem cerca de 50% de renovação de água em 11 dias. As correntes de maré de entrada da baía estão na faixa de 80 a 150 cm/s. A BG está sob o regime de um clima tropical úmido e apresenta gradiente espacial de eutrofização da boca para a cabeça da baía. Devido à grande quantidade de matéria orgânica e detritos, possui um caráter altamente eutrófico, a transparência de suas águas é extremamente baixo, especialmente nas regiões mais interiores, com valores médios de profundidade de *Secchi* menor ou igual a 1 m (KJERFVE *et al.* 1997; MAYR *et al.*, 1989; OLIVEIRA *et al.*, 2016).

IV. Fundamentação Teórica

IV.1 Sensoriamento Remoto

Em 2016, o Centro de Sensoriamento Remoto Canadense (CCRS) definiu o sensoriamento remoto como a ciência (e a arte) de aquisição de informações da superfície da Terra sem estar em contato com a mesma, a partir do registro, da detecção e da gravação de energia refletida ou emitida.

Ao complementar a definição de sensoriamento remoto, Novo (2010) restringiu seu significado ao determinar que o registro e a análise das interações são feitos entre a radiação eletromagnética e os objetos presentes na superfície da Terra, onde esses objetos podem ser: edifícios, florestas, pastagem, solo, água ou gelo. Portanto, o sensoriamento remoto se limita à utilização de sensores que medem alterações sofridas pelo campo de radiação eletromagnética.

A definição de sensoriamento remoto está sujeita a diferentes interpretações. Alguns autores (CCRS, 2016; ELACHI, 1987; SIMONETTI & ULABY, 1983) são mais abrangentes e pouco específicos. Nesse caso, os sonares poderiam ser considerados equipamentos de sensoriamento remoto por serem sensores que permitem a detecção de objetos submersos no ambiente aquático a partir do envio de um sinal acústico e do recebimento desse sinal após interagir com o alvo.

Entretanto, segundo NOVO (2010), são diversas as razões pelas quais o termo sensoriamento remoto se tornou restrito ao uso de sensores de radiação eletromagnética. Em primeiro lugar, a radiação eletromagnética não necessita de um meio de propagação, como o campo acústico necessitada água ou do ar para se propagar. Assim sendo, os sensores puderam ser colocados cada vez mais distantes dos objetos a serem medidos, até que passaram a ser colocados em satélites, dando também uma conotação de distância física à palavra “remoto”.

As principais vantagens do sensoriamento remoto são: cobertura de áreas extensas, menor custo por unidade de área de cobertura para o usuário, cobertura contínua ou frequente da área de interesse, processamento e análise computadorizada automáticos ou semiautomáticos (CAMPBELL, 1996). Por exemplo, o sensor MODIS a bordo do satélite ambiental AQUA realiza cobertura quase que global do planeta Terra em aproximadamente um dia (Fig. 4). No entanto, quando comparado à fotografia aérea, a imagem de satélite ainda apresenta uma resolução inferior (KUMAR, 2017).

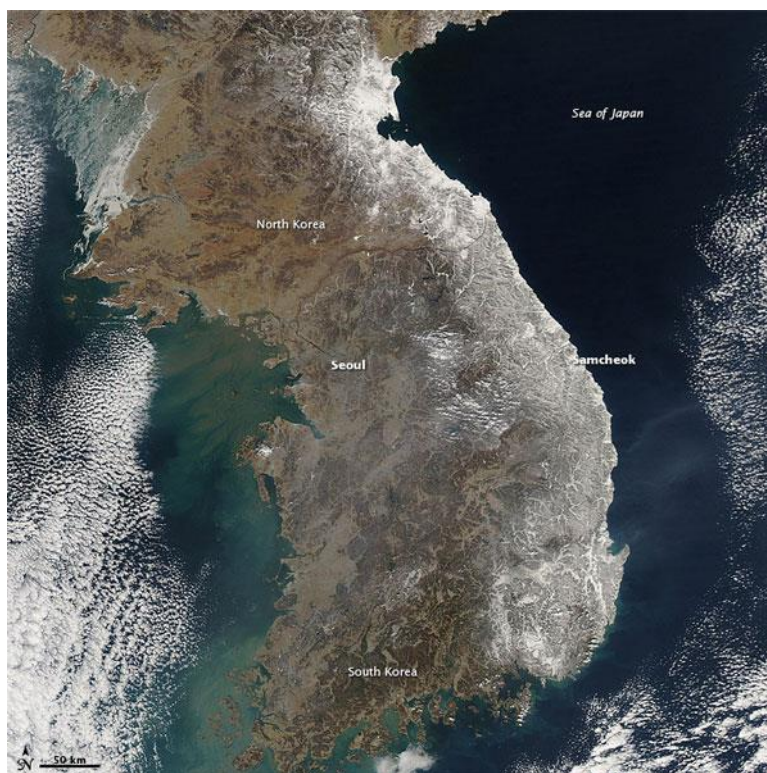


Figura 4 – Cobertura do sensor MODIS a bordo do satélite AQUA. Imagem de 15 de fevereiro de 2011, mostrando parte da península da Coreia coberta por neve (Fonte: <http://www.oeco.org.br/blogs/geonoticias>).

O histórico da técnica de sensoriamento remoto teve início do século XIX com invenção da câmera fotográfica, a qual foi amplamente utilizada para obtenção de fotos aéreas realizadas em balões e aviões. Os primeiros usos dos sensores remotos ocorreram durante a Primeira Guerra Mundial com fins de estratégia e planejamento militar, mas somente a partir da década de 60 começou a ser utilizado para fins científicos, com as primeiras imagens orbitais da superfície da Terra (FLORENZANO, 2011).

Entre as décadas de 1960 e 1970 despertaram as preocupações com as mudanças ambientais do planeta Terra e houve o aumento da utilização do sensoriamento remoto para estudos ambientais. Através de imagens e dados meteorológicos adquiridos por satélites foi possível detectar e monitorar muitas dessas mudanças. Na década de 70, houve o lançamento dos satélites de recursos naturais terrestres, como o ERTS-1 (Earth Resources Technology Satellites), chamado de Landsat-1 (Land Remote Sensing Satellite) (NOVO *et al.*, 1989), e o sensoriamento remoto orbital desde então tem se consolidado como uma técnica eficiente para coleta de dados ambientais (MARINO JUNIOR, 2006).

Atualmente diversos satélites e sensores coletam parâmetros variados para monitorar e estudar os ambientes terrestres. De maneira geral, os sensores a bordos desses satélites são calibrados com medidas radiométricas adquiridas *in situ*. Ou seja, sensores portáteis acoplados a aeronaves, embarcações ou mesmo conduzido por uma pessoa podem ser utilizados para aquisição de medidas radiométricas precisas que posteriormente podem ser utilizadas para elaboração de algoritmos biogeofísicos e aferições de procedimentos de correção atmosféricas das imagens de satélites (VALERIO *et al*, 2011).

IV.2 A Radiação Eletromagnética

No sensoriamento remoto, a radiação eletromagnética (REM) é o meio pelo qual a informação é transferida do alvo para o sensor remoto. A luz é a energia eletromagnética visível ao olho humano, utilizando como fonte de luz o Sol. As feições da superfície da Terra refletem essa luz e ao olharmos para uma fotografia, por exemplo, é a luz refletida pela fotografia que nos permite ver a imagem. A luz não é a única fonte de energia radiante emitida pelo Sol, a sensação de calor é causada pela emissão de radiação térmica, entretanto não pode ser identificada pelo sistema visual humano (CCRS, 2016).

Existem duas visões sobre a natureza da REM. Uma ondulatória, que explica muito bem as características de sua propagação e outra corpuscular (ou particular), que considera a REM como composta de partículas. A luz pode se propagar como uma onda eletromagnética ou como uma partícula. Esse comportamento dual da luz é conhecido como “*Comportamento Dual da Radiação Eletromagnética*” (MOREIRA, 2005).

James Clerk Maxwell (1831-1879) concebeu a radiação eletromagnética como uma onda eletromagnética que se desloca pelo espaço à velocidade da luz. Ele apresentou pela primeira vez uma teoria físico-matemática completa e unificada dos fenômenos elétricos e magnéticos (LORENZZETTI, 2015).

Por outro lado, o primeiro a verificar o comportamento corpuscular da radiação eletromagnética foi Max Planck (1858-1947). Ele propôs a ideia de quantização da radiação da energia emitida por corpos aquecidos. Planck supôs que a radiação é emitida em pequenos pulsos, ou pacotes de energia discretos, denominados de quanta (ou quantum, no singular) de energia. Em seu estudo sobre a emissão termal provocada por corpos aquecidos, Planck mostrou que, para determinada frequência, todos os quantum de radiação emitidos possuem a mesma energia (BRANDT, 2013; SARAIVA *et al*, 2010).

Nenhum dos dois modelos, ondulatório ou corpuscular, é tido como o mais correto. Para determinados fenômenos, tais como a propagação da radiação, a teoria ondulatória de Maxwell é mais adequada. Já o processo de interação da REM com a matéria, especialmente os fenômenos de absorção e emissão da radiação, são mais bem compreendidos pela natureza quântica (SANTOS, 2017)

De acordo com a teoria ondulatória, conceito associado às equações que modelam o comportamento ondulatório da luz, a luz viaja em linha reta (a menos que haja influência externa) com níveis de energia que se alternam de forma ondulatória. Essa alternância de energia se dá por meio de duas componentes de energia: a componente elétrica e a componente magnética, denominadas de campo elétrico (E) e campo magnético (M) (CCRS, 2016).

Como é possível notar na figura 5, o campo elétrico (E) varia em magnitude na direção perpendicular à direção de propagação da radiação (c), e o campo magnético (M) está orientado perpendicularmente ao campo elétrico e à direção de propagação da energia eletromagnética. Ambos os campos viajam com velocidade da luz (c), que é aproximadamente de 300.000 km/s. Nessa velocidade são necessários oito minutos para a luz solar atingir a superfície da Terra (CCRS, 2016).

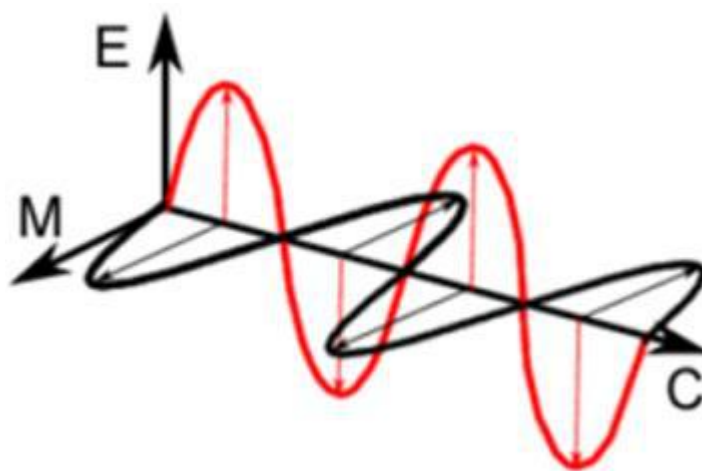


Figura 5 – (E) Representação dos campos elétricos e (M) Representação dos campos magnéticos e (C) direção de propagação da radiação (Fonte: CCRS, 2016).

Este comportamento ondulatório da luz é comum para todas as formas de radiação eletromagnética. As ondas eletromagnéticas, diferente das ondas produzidas na superfície do mar, não necessitam de meio físico para se propagarem. Existem duas características da radiação eletromagnética particularmente importantes para se

aplicar no sensoriamento remoto: o comprimento de onda (λ) e a frequência (ν) (MOREIRA, 2005).

O comprimento de onda é o comprimento de um ciclo de onda, que pode ser medido como a distância entre duas cristas sucessivas de ondas (Fig. 6). O comprimento de onda é medido em metros (m) ou alguma outra unidade associada, tal como nanômetro (nm, 10^{-9} metros), micrômetro (μm , 10^{-6} metros) ou centímetros (cm, 10^{-2} metros). A frequência diz respeito ao número de ciclos de ondas que passa por um ponto fixo por unidade de tempo. Normalmente medida em hertz (Hz), onde 1 Hz equivalente a um ciclo por segundo (MOREIRA, 2005).

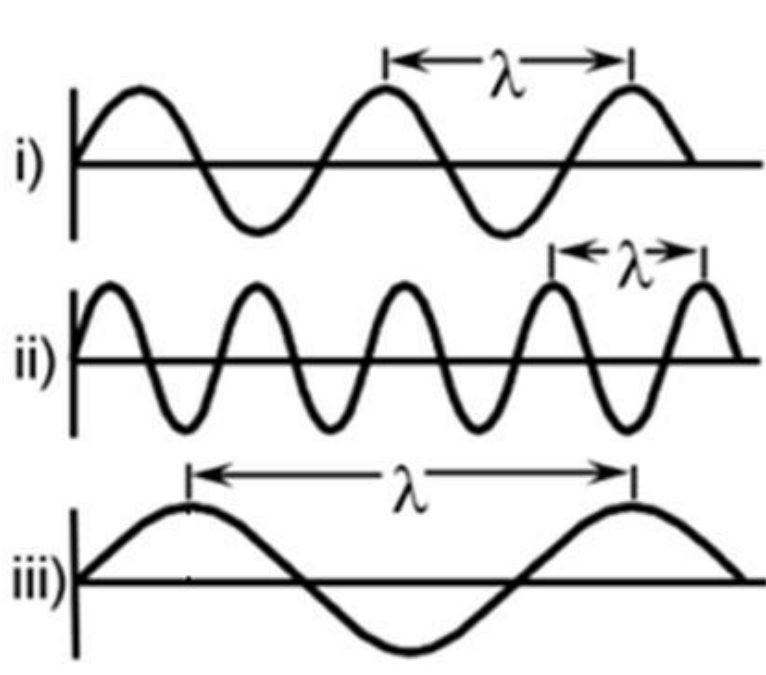


Figura 6 – Comprimento de onda da radiação (λ) (Fonte: CCRS, 2016).

O comprimento de onda e a frequência estão relacionados pela seguinte equação:

$$c = \lambda \cdot \nu \quad (4.1)$$

Onde, c = velocidade da luz (3×10^8 m/s)

λ = comprimento de onda (m)

ν = frequência (ciclos por segundo, Hz)

A energia da onda eletromagnética pode ser calculada fazendo uso da frequência da onda eletromagnética e da constante de Planck, h ($h = 6,6262 \cdot 10^{-34}$ joule.segundo).

$$Q = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda} \quad (4.2)$$

Onde, Q = energia da onda eletromagnética (J = joule)

$h = 6,6262 \cdot 10^{-34}$ J.s (constante de Planck)

ν = frequência (Hz)

c = velocidade da luz (m/s)

λ = comprimento de onda (m)

Se a velocidade da luz é constante, a relação estabelecida entre o comprimento de onda e a frequência é uma relação inversa (equação $c = \lambda \cdot \nu$). Quanto menor o comprimento de onda, mais alta a frequência e a energia associada à onda eletromagnética (Q). Quanto maior o comprimento de onda, mais baixa a frequência e a energia associada à onda eletromagnética (Q). Desta maneira, a luz azul tem $\lambda = 0,4 \mu\text{m}$ e a luz vermelha tem $\lambda = 0,6 \mu\text{m}$, então a luz azul tem maior frequência e energia quando comparada com a luz vermelha (Fig. 7) (MENESES & ALMEIDA, 2012).

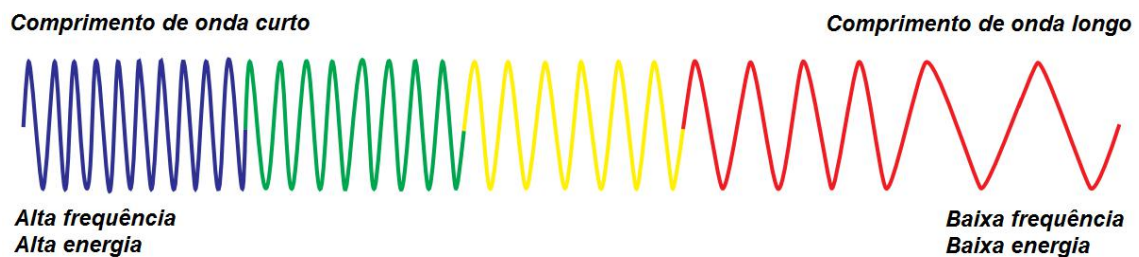


Figura 7 – Quanto menor o comprimento de onda da radiação eletromagnética, mais alta a frequência e a energia associada à onda eletromagnética (Fonte: Adaptado de BAKKER *et al*, 2009).

Para o sensoriamento remoto da superfície terrestre, o Sol é a principal fonte de energia eletromagnética. No entanto, qualquer matéria com temperatura absoluta acima de zero absoluto (zero Kelvin, $0 \text{ K} = -273,15^\circ \text{ C}$), que é a menor temperatura possível de ser encontrada, emite radiação eletromagnética devido à agitação das moléculas (FLORENZANO, 2011).

A temperatura do Sol é de aproximadamente 6000 K. Devido aos processos nucleares que ocorrem no interior do sol, o processo de emissão da radiação solar se dá ao longo de todo o espectro eletromagnético. Ele produz um espectro contínuo de radiação eletromagnética variando desde ondas muito curtas, da ordem de Angstrom (10^{-10} m), como os raios gama, até ondas de rádio de comprimento de onda muito longo, da ordem de quilômetros (10^3 m) (CCRS, 2016).

O espectro eletromagnético representa o conjunto de comprimentos de onda conhecidos, que vão desde a região de comprimento de onda curto (raios gama, raios X, ultravioleta (UV) e visível) até a região de comprimento de onda longo (infravermelho (IV), micro-ondas e ondas de rádio). A figura 8 evidencia os intervalos de variação do espectro eletromagnético e suas denominações (CCRS, 2016).

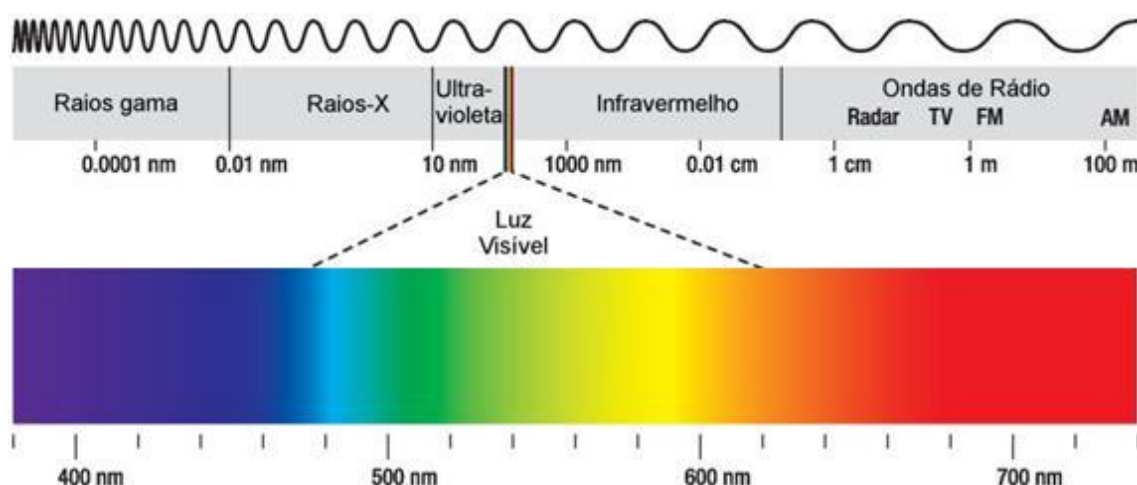


Figura 8 – O espectro eletromagnético (Fonte: Adaptado da Ilustração de Peter Hermes Furian - <https://www.infoescola.com/fisica/espectro-eletromagnetico/>).

Há várias regiões do espectro eletromagnético que são úteis para o sensoriamento remoto da superfície terrestre. As principais faixas espectrais utilizadas para o sensoriamento remoto da superfície terrestre são: do visível (0,38 – 0,76 μ m), do infravermelho (0,8 – 300 μ m) e das micro-ondas (0,01 – 100 cm). O termo banda é uma referência a uma região espectral específica do espectro eletromagnético, ou seja, um intervalo de comprimentos de onda (CHEN, 1985). A tabela 1 mostra as principais faixas (ou bandas) espectrais utilizadas pelos sensores remotos que coletam informações da superfície da Terra.

Tabela 1 – Principais regiões espectrais utilizadas para o sensoriamento remoto da superfície terrestre (Fonte: Adaptado de CHEN, 1985).

Nome da região	Nome do comprimento de onda	Regiões espectrais
Visível	Violeta	0,38 - 0,45 μm
	Azul	0,45 - 0,49 μm
	Verde	0,49 - 0,56 μm
	Amarelo	0,56 - 0,59 μm
	Laranja	0,59 - 0,63 μm
	Vermelho	0,63 - 0,76 μm
Infravermelho	Infravermelho próximo	0,80 - 1,50 μm
	Infravermelho de ondas curtas	1,50 - 3,00 μm
	Infravermelho médio	3,00 - 5,00 μm
	Infravermelho longo (ou Termal)	5,00 - 15 μm
	Infravermelho distante	15,0 - 300 μm
Micro-ondas	Submilimétrica	0,01 - 0,10 cm
	Milímetro	0,10 - 1,00 cm
	Micro-ondas	1,0 - 100 cm

Na prática, a região do ultravioleta tem o menor comprimento de onda para o sensoriamento remoto terrestre. Alguns materiais presentes na superfície terrestre, especialmente rochas e minerais, emitem luz visível quando iluminados com radiação ultravioleta (BATISTA & DIAS, 2005).

A porção visível é apenas uma pequena fração do espectro eletromagnético, e se estende de 0,38 a 0,76 μm . Nesta região, o menor comprimento de onda é o violeta, e o maior comprimento de onda é o vermelho. O ser humano enxerga um objeto verde, por exemplo, quando este reflete predominantemente energia eletromagnética de comprimento de onda 0,5 μm (ALCÂNTARA, 2016).

A próxima região de interesse é a região do infravermelho (IV). Essa região está situada entre os comprimentos de onda de 0,8 a 300 μm . A banda do IV é pelo

menos 100 vezes mais larga do que a banda do visível. A banda do IV próximo, por exemplo, pode ser utilizada para diferenciar tipos de vegetação. Já a banda do IV Termal é geralmente utilizada para estimar a temperatura da superfície terrestre (tanto no oceano como no continente) (ECHER *et al.*, 2006).

A região de micro-ondas possui comprimentos de onda que varia entre 1 mm e 1 m. Essa região possui os maiores comprimentos de onda utilizados no sensoriamento remoto terrestre. Diversos parâmetros ambientais são atualmente coletados por meio de sensores que operam na região de micro-ondas, como por exemplo, rugosidade da superfície terrestre e vento na superfície do mar (DI MAIO *et al.*, 2008).

IV.3 Grandezas Radiométricas

O aspecto geométrico de incidência da radiação tem grande relevância nas medidas da REM. Portanto, é conveniente inicialmente explicar o conceito de ângulo sólido.

Considere a área (A) determinada pela intersecção de um cone que tem seu vértice na origem de uma esfera de raio (r), conforme a figura 9. O Ângulo Sólido (Ω) é determinado pela razão entre a área A e o quadrado do raio da esfera, r :

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \quad (4.3)$$

A unidade de ângulo sólido (Ω) é o esterradiano (sr).

Sabendo que a área de uma esfera de raio r é $A = 4\pi r^2$, pode-se facilmente concluir que o ângulo sólido de uma esfera é de 4π sr.

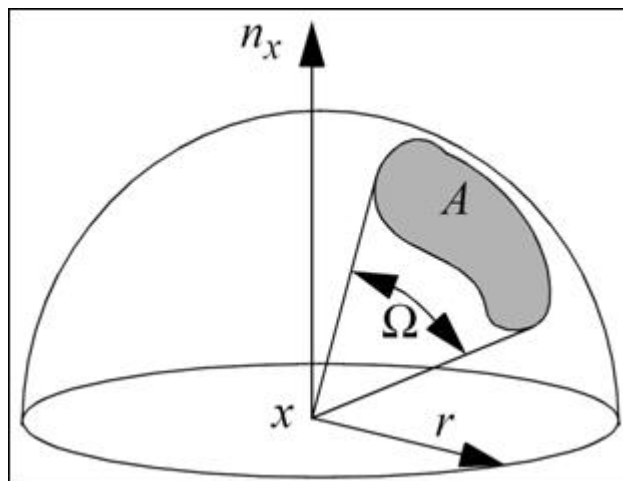


Figura 9 – Definição de Ângulo Sólido (Ω). Área (A) determinada pela intersecção de um cone que tem seu vértice na origem de uma esfera de raio r (Fonte: Google Images).

A Radiometria é a ciência que estuda a medição da distribuição de radiação eletromagnética que é transferida de uma fonte para um receptor. Ela trata de um conjunto de unidades que possibilita a quantificação da REM de maneira mais precisa (ALMEIDA, 1997).

As grandezas radiométricas básicas para o sensoriamento remoto que dizem respeito a este estudo são: reflectância, absortância, transmitância, energia radiante, irradiância, radiância.

A radiação eletromagnética incidente sobre a superfície de um objeto, é parcialmente refletida, absorvida ou transmitida, dependendo do comprimento de onda da radiação incidente, do material e da superfície do objeto. A distinção dos diferentes objetos permite distingui-los numa imagem de satélite (SANTOS, 2017).

A equação do balanço de radiação estabelece que a quantidade total de fluxo radiante incidente ($\Phi_{\text{incidente}}$) sobre uma superfície deve ser balanceada pela quantidade de fluxo radiante refletido, absorvido e transmitido pela superfície ($\Phi_{\text{refletido}}$, $\Phi_{\text{absorvido}}$ e $\Phi_{\text{transmitido}}$, respectivamente) (PEREIRA, *et al.*, 2007):

$$\Phi_{\text{incidente}} = \Phi_{\text{refletido}} + \Phi_{\text{absorvido}} + \Phi_{\text{transmitido}} \quad (4.4)$$

A Reflectância (ρ) é a razão adimensional entre a radiação refletida por uma superfície e a radiação incidente nesta superfície. A Transmitância (τ) é a razão adimensional entre a radiação transmitida por uma superfície e a radiação incidente nesta superfície. A Absortância (α) é a razão adimensional entre a radiação absorvida por uma superfície e a radiação incidente nesta superfície (ALCÂNTARA, 2014).

$$\rho = \frac{\Phi_{\text{refletido}}}{\Phi_{\text{incidente}}} \quad (4.5)$$

$$\tau = \frac{\Phi_{\text{transmitido}}}{\Phi_{\text{incidente}}} \quad (4.6)$$

$$\alpha = \frac{\Phi_{\text{absorvido}}}{\Phi_{\text{incidente}}} \quad (4.7)$$

Onde ρ , τ , α são adimensionais e expressam valores que variam de 0 a 1. Por exemplo, se incide 100 W.m^{-2} sobre uma superfície e essa mesma superfície reflete 30 W.m^{-2} então $\rho = 30/100 = 0,3$ que pode ser expresso em porcentagem $\rho = 30\%$.

Assim, como mostra a figura 10, a reflectância é o processo pelo qual a radiação é “refletida” num objeto, como o topo de uma nuvem, um corpo d’água ou um

solo exposto. Há vários tipos de superfícies refletoras. A transmitância é quando a radiação passa através de um meio. A absorptância é quando a radiação é absorvida pelo meio, podendo, posteriormente, ser reemitida em comprimentos de onda maiores. Por exemplo, a água do mar absorve o comprimento de onda curto (visível) e emite no infravermelho termal (PALMER, 1995).

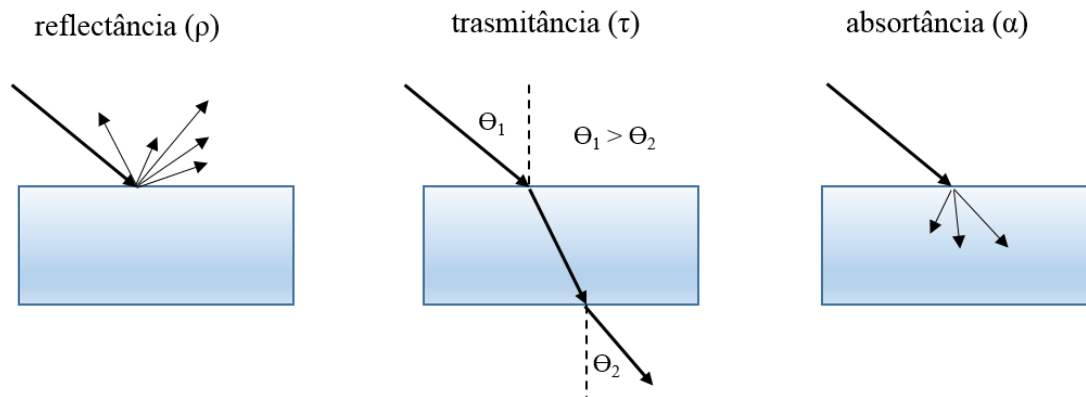


Figura 10 – Reflectância, Transmitância e Absortância.

A energia radiante (Q) transportada pela REM pode ser entendida como o somatório das contribuições individuais de cada fóton que compõe o feixe de REM (Equação 4.2). Esta é uma grandeza fundamental e sua unidade de medida é o Joule(J). Segundo Novo (2010), a energia radiante transportada pela REM é uma medida da capacidade que a radiação tem de “executar trabalho”, ou seja, alterar o estado da matéria com a qual interage. A energia radiante provoca, por exemplo, mudanças na temperatura de um detector, e essas mudanças são proporcionais à quantidade de energia transportada pela REM.

A irradiância é a taxa de radiação que incide sobre a superfície de um objeto ou um detector. Irradiância (E) é a razão entre a radiação incidente e uma superfície de área A (MENESES & ALMEIDA, 2012)

$$E = \frac{\Phi}{A} \quad (4.8)$$

Onde a unidade de E , é $W.m^{-2}$.

Os raios solares representados na figura 10 encontram-se em apenas uma direção, mas a radiação que alcança a área A vem de todas as direções, incluindo a luz difusa que é espalhada pela atmosfera e que eventualmente incide sobre a área A (PALMER, 1995).

A radiância (L) está relacionada diretamente com a forma com que os nossos olhos enxergam o brilho dos objetos, sendo definida como o fluxo radiante por unidade de ângulo sólido e por unidade de área projetada em uma direção específica (JENSEN, 2009).

O conceito de radiância está ilustrado na figura 11, onde a área fonte (A) emite radiação para todas as direções. Porém, o que importa para a radiância é apenas o fluxo radiante que deixa a área-fonte (A) projetada em uma certa direção ($\cos \Theta$) e num ângulo sólido (Ω), conforme a fórmula (JENSEN, 2009):

$$L = \frac{\Phi}{\Omega} \cdot \frac{1}{A \cdot \cos(\Theta)} \quad (4.9)$$

Onde $I = \Phi \Omega =$ intensidade radiante ($\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$),

Φ = fluxo radiante (W),

Ω = ângulo sólido,

A = área-fonte (da qual o fluxo radioativo emerge),

Θ = ângulo de inclinação entre o vetor normal à superfície da área-fonte e a direção do ângulo sólido.

L = radiância ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$).

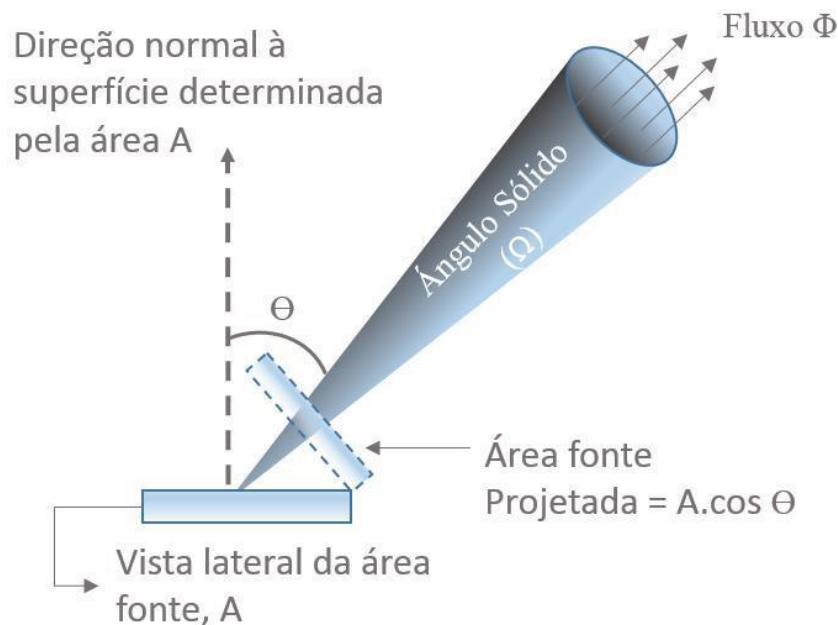


Figura 11 – Conceito de radiância com uma área-fonte projetada, em uma direção específica, e um ângulo sólido específico (Fonte: Adaptada de ALCÂNTARA, 2014).

Radiômetros são equipamentos que medem a energia radiante. Ele precisa estar corretamente posicionado para coletar a radiância descendente, ou seja, proveniente do céu e ascendente, isto é, proveniente da água (Fig.12). Diferente da irradiância, que é afetada pela distância entre o sensor remoto e o alvo, a radiância não é afetada pela distância, por isso a grandeza radiométrica medida por vários sensores orbitais é a radiância (LORENZZETTI, 2015).



Figura 12 – Radiômetros: equipamentos utilizados para medir a energia radiante (Fonte: <http://www.seos-project.eu/modules/laser-rs/laser-rs-c03-s03-p01.html>).

IV.4 Substâncias Opticamente Ativas

O sensoriamento remoto dos oceanos envolve a análise de variações na magnitude e qualidade espectral da radiação emergente da água para, em seguida, derivar informações quantitativas sobre os tipos de substâncias presentes em seu volume e suas concentrações. Ao analisar as propriedades ópticas do meio aquático, é necessário distinguir os efeitos da água pura sobre o campo de luz submerso dos efeitos causados devido à presença dessas substâncias. Três principais substâncias opticamente ativas, além da água pura, influenciam as propriedades ópticas de corpos d'água naturais: o fitoplâncton, o material particulado em suspensão e as substâncias

orgânicas dissolvidas que conferem cor à água (ou CDOM – *colored dissolved organic matter*) (BUKATA, 1995; KIRK, 1994).

Saber como as diferentes substâncias opticamente ativas da água do mar alteram o caminho da radiação solar incidente é essencial para o uso eficiente dos dados de sensoriamento remoto. Este entendimento pode ser integrado na forma de algoritmos empíricos regionais que definem as relações entre os constituintes biogeoquímicos da água do mar e as medidas de sensoriamento remoto. Uma vez construídos, os algoritmos podem ser aplicados às imagens de satélites para estimar e monitorar as principais substâncias opticamente ativas.

Os algoritmos para estimativas das concentrações de clorofila-a (Chl-a) nas águas oceânicas fazem uso das bandas centradas nos comprimentos de onda do azul e verde, pois sabe-se que a substância clorofila, presente nos organismos que realizam a fotossíntese, absorve luz no azul e não absorve luz na região do verde. E a partir das imagens dos satélites que operam na região espectral do visível e dos algoritmos para estimativa da clorofila são produzidas imagens de concentrações de clorofila nos oceanos (KAMPEL *et al.*, 2005).

A figura 13 é uma imagem de 06 de maio de 2005 do sensor MODIS a bordo do satélite AQUA, apontando a distribuição típica das concentrações superficiais de clorofila-a (Chl-a) ao longo de uma parte da plataforma continental brasileira do Sudeste. A escala de cores é logarítmica: cores azuis representam menores valores de Chl ($< 0,2 \text{ mgm}^{-3}$) associados a águas mais oligotróficas; cores verde/amarelo/vermelhas estão associadas a maiores valores de Chl. A estação de séries temporais ANTARES-Ubatuba está localizada em $23^{\circ}44'S$ e $45^{\circ}00'W$, indicada por um ponto vermelho (Fonte: KAMPEL *et al.*, 2007).

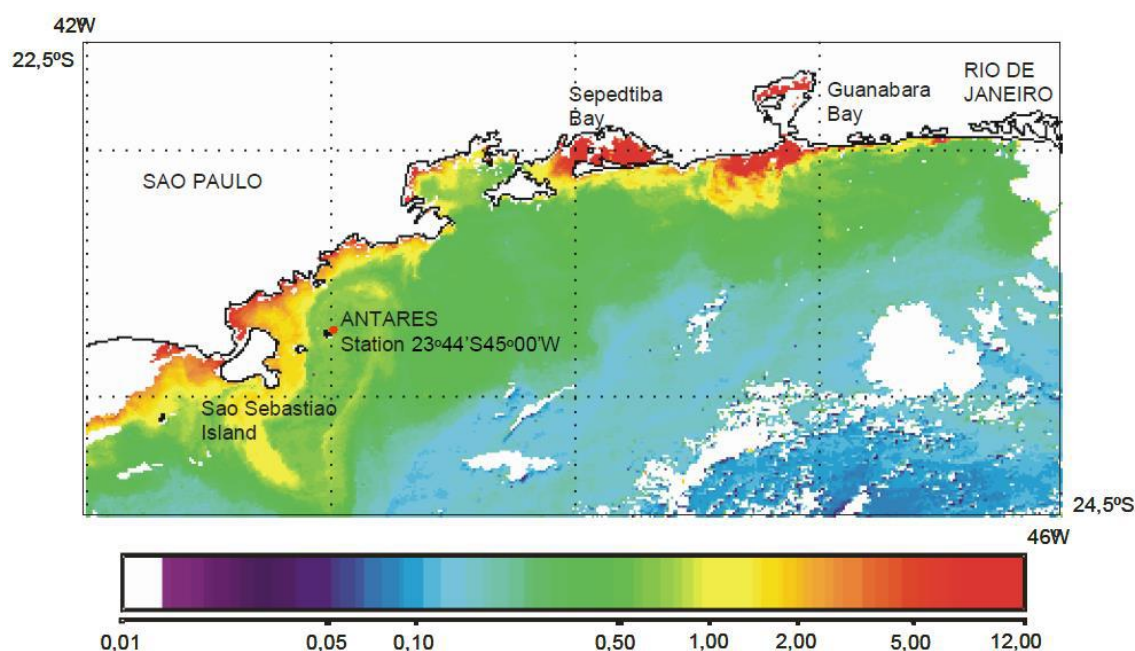


Figura 13 – Imagem de 06 de maio de 2005 do sensor MODIS a bordo do satélite AQUA (Fonte: KAMPEL et al., 2007).

A interação da radiação eletromagnética ocorre com a água e com demais as substâncias opticamente ativas presentes nos corpos aquáticos naturais:

- fitoplâncton, que são organismos que realizam o processo de fotossíntese por meio do pigmento fotossintético ativo (denominado clorofila);
- material particulado em suspensão (orgânico e inorgânico);
- material orgânico dissolvido em suspensão (porosidade de até $0,2\ \mu\text{m}$).

São as principais substâncias opticamente ativas que conferem cor aos corpos aquáticos. As variações de concentrações dessas substâncias determinam se a água é mais clara ou mais escura, se tem uma tonalidade marrom ou verde (BRICAUD & SATHYENDRANATH, 1981). Por exemplo, a figura 14a mostra uma água clara, com baixa concentração de fitoplâncton e de materiais particulado e dissolvido em suspensão. As regiões oceânicas distantes da costa geralmente apresentam águas com essas características.

Já na figura 14b, a água é caracterizada por uma tonalidade escura, devido à alta concentração de matéria orgânica dissolvida, onde os rios Negro e Solimões se encontram e por possuírem grande carga de material particulado em suspensão, caracteriza uma tonalidade marrom clara à água.



Figura 14 – Tipos de corpos aquáticos com diferentes concentrações das principais substâncias opticamente ativas (fitoplâncton, material particulado em suspensão e material dissolvido em suspensão) (Fonte: Google Images).

Como pode ser observado na figura 15, as ondas eletromagnéticas localizadas nas regiões espectrais do ultravioleta, visível e infravermelho próximo (300 a 800 nm) interagem com a água pura. A região espectral da luz azul é menos absorvida pela água, penetrando mais fundo; na região do vermelho e do infravermelho, há uma absorção proporcional da radiação de acordo com o aumento do comprimento de onda (quase toda radiação incidente na água é imediatamente absorvida); na região

espectral do violeta e do verde, a REM sofre maior absorção quando comparada com a região espectral do azul, porém penetra mais na água quando comparada com os comprimentos de onda do ultravioleta e os comprimentos de onda superiores ao amarelo (DI MAIO *et al.*, 2008).

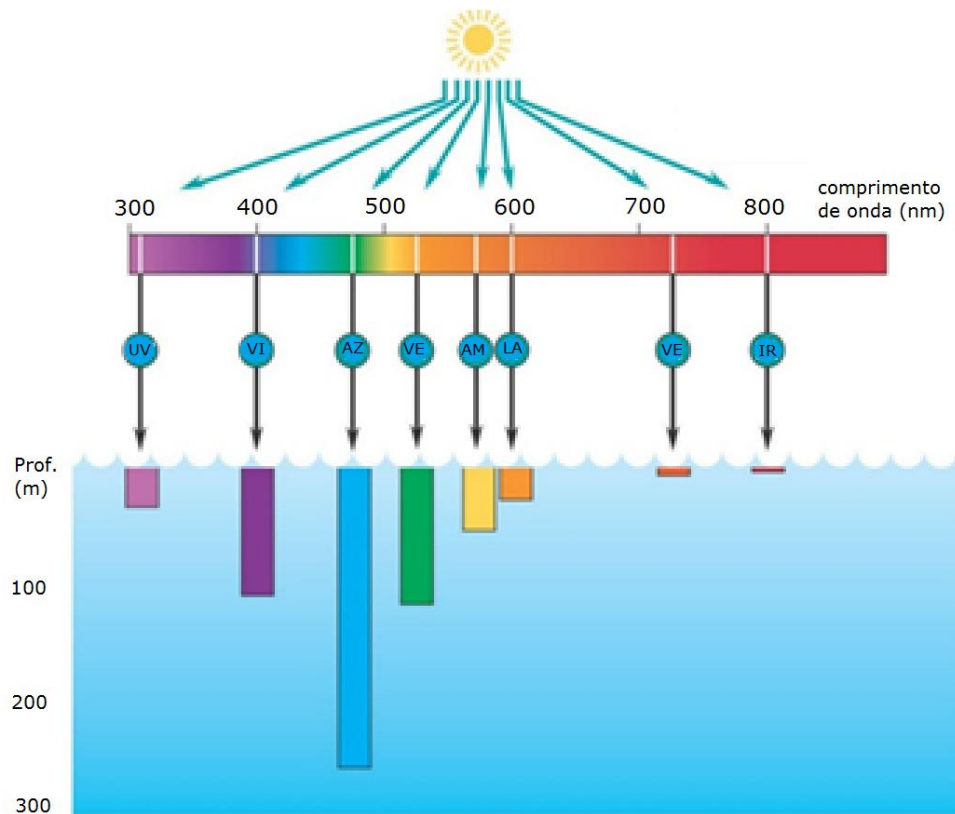


Figura 15 – Profundidade de penetração da radiação eletromagnética na água ($300 \text{ nm} \leq \lambda \leq 800 \text{ nm}$). Onde: UV é ultravioleta, VI violeta, AZ azul, VE verde, AM amarelo, LA laranja, VE vermelho, IR infravermelho (Fonte: Adaptada de <http://ksuweb.kennesaw.edu/~jdimber/BioOceanography/Lectures>)

Em relação às principais substâncias opticamente ativas, pode-se considerar uma de cada vez isoladamente para melhor compreensão, embora nos corpos aquáticos naturais essas substâncias são encontradas simultaneamente e em proporções variadas (JENSEN, 2009).

As três curvas tracejadas na figura 16 (a, b, c) representam a reflectância que emerge da água pura, ou seja, sem a presença das principais substâncias opticamente ativas. Nesse caso, o espectro de reflectância da água pura tem valores maiores de reflectância na região espectral do azul e valores decrescentes para comprimentos de onda superiores ao azul (JENSEN, 2009).

A radiação de comprimento de onda do azul penetra mais na água, é mais espalhada pelas moléculas d'água e menos absorvida em relação aos demais comprimentos de onda. Consequentemente, tem mais chances de retornar à superfície após interagir com a coluna d'água (JENSEN, 2009).

Já o espectro de reflectância na região do visível quando as principais substâncias opticamente são adicionadas à água em proporções crescentes, são da seguinte forma, segundo as setas presentes na figura 16 (a, b, c): estas indicam as direções nas quais as curvas de reflectância (curvas contínuas) são impactadas com o aumento das concentrações das principais substâncias opticamente ativas. Quanto maior a concentração das principais substâncias opticamente ativas, mais diferente são as curvas contínuas das curvas tracejadas (JENSEN, 2009).

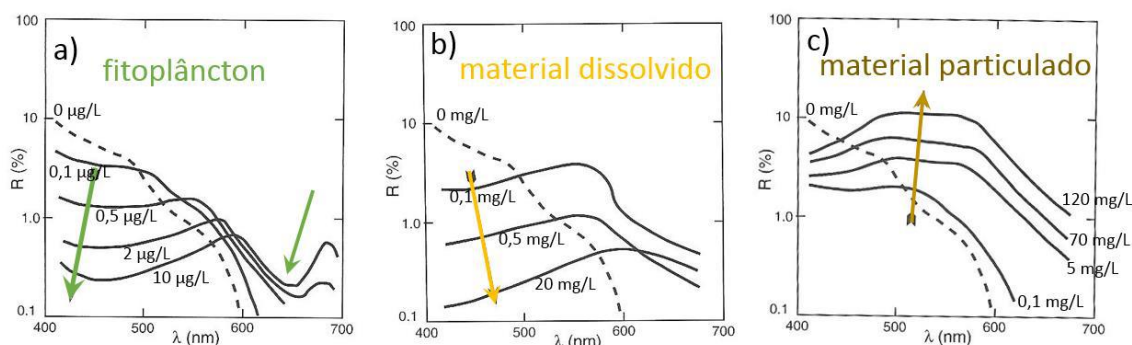


Figura 16 – Espectro de reflectância da água pura (linhas tracejadas) e espectro de reflectância da água em função do aumento das concentrações ($\mu\text{g/L}$, mg/L) das principais substâncias opticamente ativas (linhas contínuas) (Fonte: Adaptado de JENSEN, 2009).

De maneira geral, com o aumento das concentrações de fitoplâncton na água, os valores de reflectância nas regiões espectrais do azul e do vermelho tornam-se menores (Fig. 16a). Aumentando-se as concentrações de material dissolvido, reduz a reflectância nas regiões espectrais do azul e do verde (Fig. 16b). Por outro lado, quanto maior a concentração de material particulado em suspensão na água, os espectros de reflectância aumentam como um todo em relação à curva de reflectância da água pura (Figura 16c) (JENSEN, 2009).

IV.5 Classificação e Algoritmos Bio-ópticos para Estimativas

O esquema de classificação bio-óptica foi introduzido na literatura por Morel & Prieur (1977), com o objetivo de interpretar a composição espectral de um alvo aquático em relação às suas propriedades ópticas. Os autores indicaram, como base

para diferenciar os tipos de água, a razão da concentração do pigmento pelo coeficiente de espalhamento. Nesta classificação dois grupos distintos foram identificados: Caso 1 e Caso 2. Essa classificação foi revisada algumas vezes (GORDON & MOREL, 1983; MOREL, 1988) e atualmente as características de cada caso são bem definidas.

Na água do Caso 1, as demais substâncias opticamente ativas presentes na água do mar covariam com a produtividade primária local. A definição de Caso 1 sugere que o fitoplâncton e todo seu material biológico derivado são os principais agentes responsáveis pelas variações ópticas na água (MOREL & PRIEUR, 1977).

No Caso 2, não é observada correlação entre a produtividade primária autóctone e as demais substâncias opticamente ativas. As propriedades dessa água não são influenciadas somente pelo fitoplâncton, mas por outros constituintes que variam independentemente dele, especialmente, partículas inorgânicas em suspensão e Material Orgânico Colorido Dissolvido (CDOM) (IOCCG, 2000). As águas do Caso 2 costumam ser mais complexas devido à relação não linear entre as propriedades ópticas. Nestas águas geralmente há a entrada de componentes de origem terrígena, em localidades confinadas nas regiões costeiras ou em corpos d'água interiores fechados (MOREL & PRIEUR, 1977).

Nenhum dos casos isolados são encontrados na natureza, existindo uma variabilidade intermediária entre o Caso 1 e 2. O esquema de classificação deve ser analisado cuidadosamente, uma vez que mesmo em águas onde o fitoplâncton é dominante, o CDOM pode não estar variando simultânea e instantaneamente com a concentração de clorofila (MOBLEY *et al.*, 2004; BRICAUD *et al.*, 1988).

Também podemos identificar diferentes tipos de água de acordo com os espectros de R_{rs} , como os mostrados na figura 17. Os tipos águas variam entre aquelas com altíssimas a altas concentrações de sedimentos em suspensão e substâncias amarelas (a e b), com concentração moderada destes e pouca Chl-*a* (c), com água pura (d), com concentrações de sedimentos e Chl-*a* moderados (e), águas com somente concentração de Chl-*a* moderada (f). Destes espectros, somente (d) e (f) são Caso 1, o restante é Caso 2. Desta maneira, é nítido que mudanças no sinal de R_{rs} são reflexo das alterações dos constituintes opticamente ativos da água do mar (IOCCG, 2000).

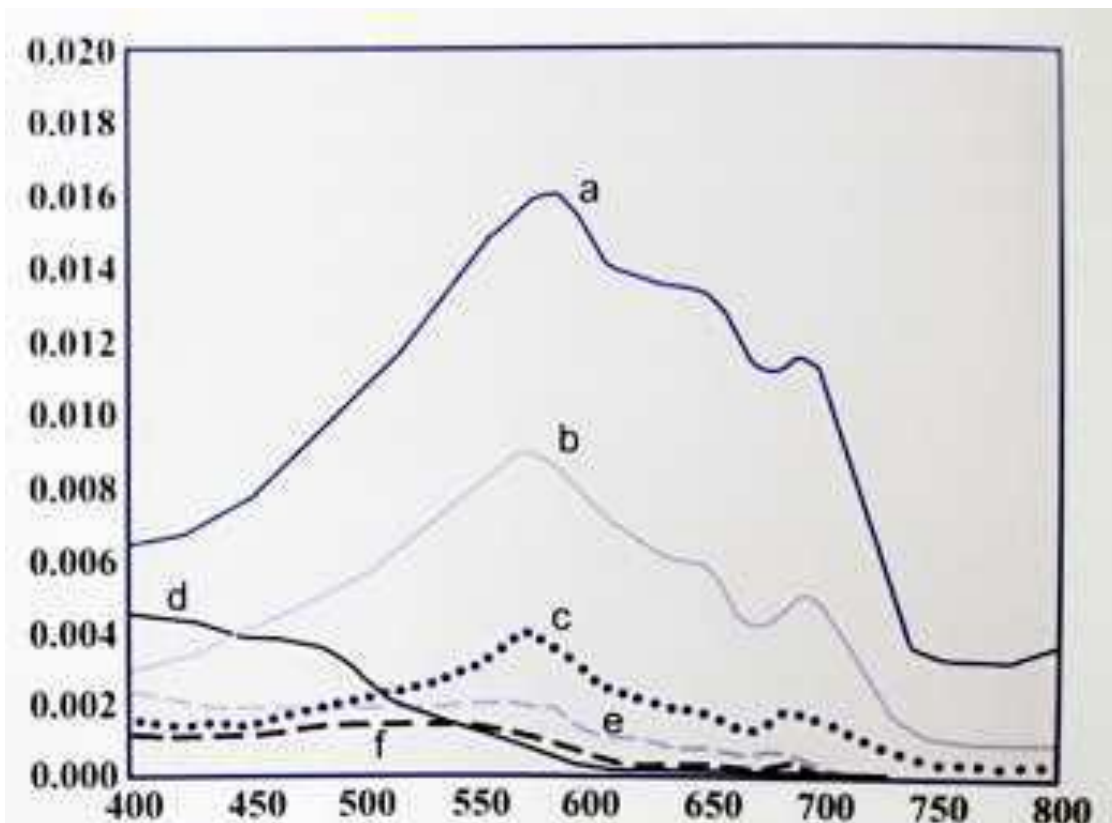


Figura 17 – Espectros de R_{rs} (sr^{-1}) pelo comprimento de onda (nm), para águas Caso 1 e 2 com diferentes concentrações dos constituintes. Espectros (a), (b), (c) e (e): Caso 2. Espectros (d) e (f): Caso 1 (Fonte: IOCCG, 2000).

Esta classificação é útil quando a finalidade é desenvolver modelos e algoritmos empíricos adequados para cada tipo de água. Quando as propriedades são conhecidas e se encaixam em um esquema de classificação, existe a possibilidade de gerar modelos bio-ópticos específicos (MOBLEY *et al.*, 2004).

O aprimoramento dos algoritmos empíricos baseados no sistema de classificação da reflectância de sensoriamento remoto incentivou o desenvolvimento de sensores para a cor do oceano (MOBLEY *et al.*, 2004).

Geralmente, os algoritmos bio-ópticos desenvolvidos para serem aplicados em escala global não funcionam em casos de águas opticamente complexas, no caso, água do Caso-2. Por serem muito específicos, complexos e não lineares, há muitas variáveis que modificam a característica do problema. Por isso, existe a necessidade de se desenvolver algoritmos regionais, com parâmetros locais obtidos *in situ* (VALÉRIO, 2013).

V. Metodologia

V.1 Localização dos Pontos de Amostragem

Para facilitar a posterior interpretação dos resultados, foram mapeados os 6 pontos de análise deste estudo, de acordo com a tabela 2 e a figura 18. Os pontos BG-01, URCA e BG-07 estão posicionados no canal central da BG, onde ocorre a maior invasão de águas oceânicas. O ponto PQ está posicionado bem próximo à ilha de Paquetá, com menor profundidade (em comparação com os pontos BG-01, URCA e BG-07) e menos influenciado pelas correntes de maré. As correntes são mais fracas nos pontos CAJU e BG-34, mas estão sob a influência da entrada de rios, recebendo uma contribuição significativa de seus insumos, além do grande fluxo de emissões municipais e industriais, sendo os pontos mais impactados por atividades antropogênicas dos pontos analisados no presente trabalho. Vale ressaltar que todas as coletas foram feitas durante marés de quadratura, por isso foi possível admitir a baixa influência da variação dos parâmetros de clorofila entre as marés alta e baixa.

Tabela 2 – Localização dos Pontos de Amostragem na BG.

Ponto	Longitude	Latitude
Urca	-43.15903	-22.94083
BG-01	-43.147539	-22.928539
BG-07	-43.166047	-22.877931
Bg-34	-43.248184	-22.835935
PQ	-43.113034	-22.771787
Caju	-43.214722	-22.871111



Figura 18 – Pontos de coleta na Baía de Guanabara.

V.2 Coletas de Dados Biogeoquímicos e Radiométricos

O presente projeto conta com uma base expressiva de dados (parâmetros biogeoquímicos e dados radiométricos coletados *in situ*) adquirida pelo Professor

Eduardo Negri de Oliveira durante o período de 2012 a 2017 na região da Baía de Guanabara. Foram realizadas 23 campanhas oceanográficas, contemplando períodos sazonais úmidos (outubro a março) e secos (abril a setembro). Para cada campanha oceanográfica foram coletadas amostras de água superficiais (0,5 m, garrafas Van Dor), uma para cada ponto, porém com tréplica de análise em laboratório para quantificação da concentração de clorofila-*a* nos 6 pontos distribuídos ao longo da Baía de Guanabara e apresentados na figura 18. Concomitantemente, medidas radiométricas (Fig. 19), temperatura da água e profundidade de *Secchi* foram adquiridas nos pontos de coleta.

Os dados radiométricos foram adquiridos utilizando um radiômetro portátil da marca ASD Hand Held Field Spec. O radiômetro coleta o espectro radiométrico que emerge da coluna da água no intervalo de comprimento de onda de 350 - 1250 nm, com resolução espectral de 1 nm. Para cada ponto, foram feitos aproximadamente 20 a 30 medidas.

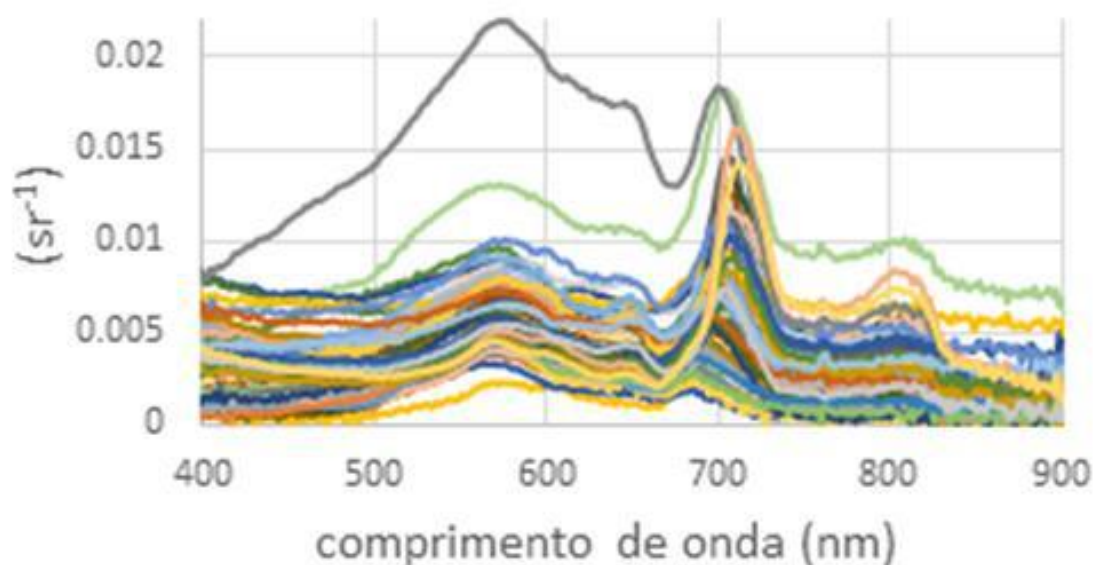


Figura 19 – Modelo de medidas radiométricas coletadas na região de estudo.

V.3 Concentração *In Situ* de Clorofila-*a*

As análises laboratoriais das concentrações de clorofila-*a* foram realizadas pelo laboratório de Hidrobiologia. As amostras de água foram filtradas usando filtros de membrana de celulose (Millipore HAWP 0,45 μm) imediatamente após a coleta e os filtros foram armazenados em nitrogênio líquido. A Chl-*a* foi determinada após extração em 90% de acetona durante um período de 18 horas a 4 °C. Ambas as

medidas (espectrofotômetro de varredura Perkin-Elmer Lambda 25) e os cálculos foram baseados em procedimentos e equações descritos por Parsons *et al.* (1984). O espectrofotômetro foi calibrado com Chl-a puro e o limite de detecção estimado foi 0,02 mg/m³ (Instituto de Biologia/UFRJ).

V.4 Processamento dos dados Radiométricos, Filtragem e Normalização das Curvas de Reflectância de Sensoriamento Remoto

A reflectância de sensoriamento remoto (R_{rs} , unidade: sr⁻¹) foi calculada a partir das medidas radiométricas coletadas *in situ*, utilizando a metodologia proposta por Mobley (1999). Resumidamente, a R_{rs} é calculada a partir da razão entre a radiância (L , unidade: W.m⁻².sr⁻¹.nm) que sai da superfície da água e a irradiância (E , unidade: W.m⁻².nm) solar que alcança a superfície da água.

A reflectância foi calculada considerando-se as medidas de radiância proveniente do céu (L_{sky}), da água (L_{water}), da placa (L_{plate}) e o fator de calibração da placa (P_{plate}). A equação a seguir expressa a R_{rs} em função das medidas radiométricas coletadas.

$$R_{rs} = \frac{L_{water} - 0,024 * L_{sky} * P_{plate}}{L_{plate} * \pi} \quad (5.4.1)$$

A radiância do céu (L_{sky}) é subtraída da radiância da água (L_{water}) a fim de se reduzir o efeito da reflexão do céu na superfície da água, para tanto, o fator de 0,024 (MOBLEY, 1999) foi utilizado para quantizar a componente do céu que efetivamente impacta a radiância que deixa a coluna d'água. O denominador da equação 5.4.1 ($L_{plate} * \pi$) expressa a irradiância solar no momento de aquisição das medidas radiométricas.

As curvas de radiância foram inicialmente selecionadas por meio da inspeção visual da coerência dos seus valores (Fig. 20). Por exemplo, em um mesmo dia e para cada ponto, foram coletadas aproximadamente de 10 a 20 medidas radiométricas para cada um dos alvos: água, placa e céu. Caso essas medidas radiométricas apresentassem discrepância significativa entre as curvas de radiância de um mesmo alvo, as medidas relativas ao ponto considerado eram descartadas, caso as medidas radiométricas não apresentassem discrepância significativa, como a figura 20, as curvas radiométricas foram mantidas para posterior cálculo da R_{rs} conforme Equação 5.4.1 e figura 21.

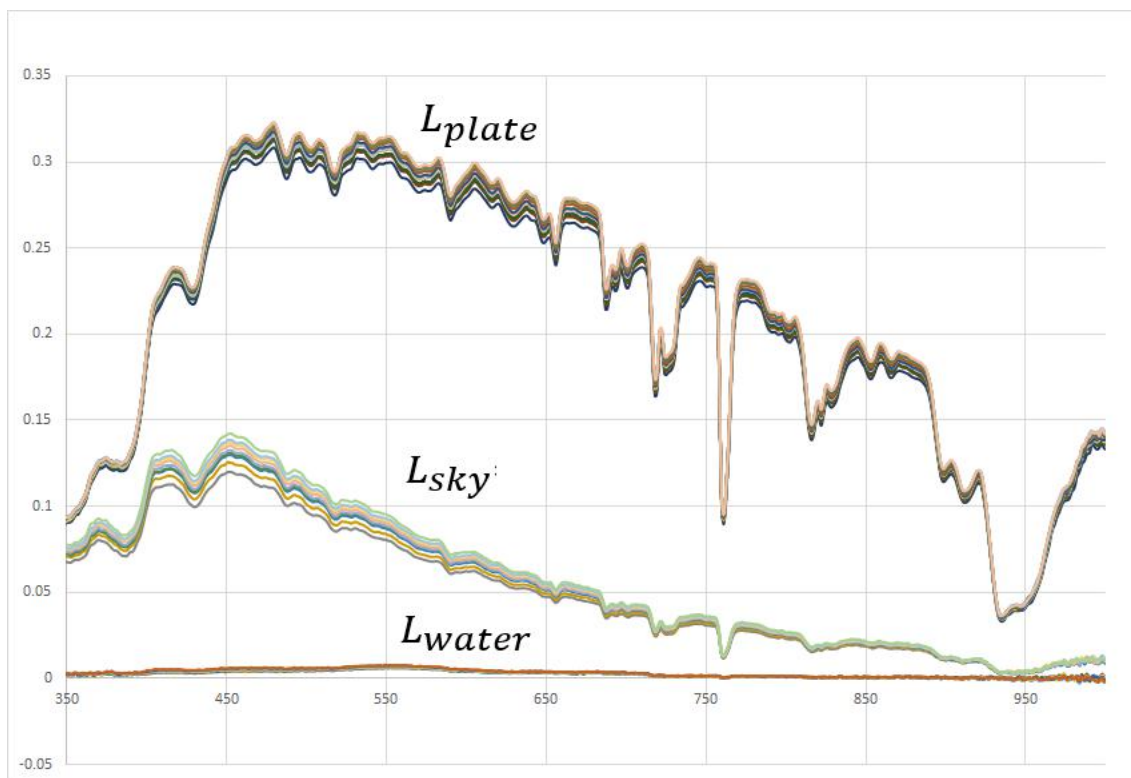


Figura 20 – Medidas da radiância da Placa, do Céu e da Água.

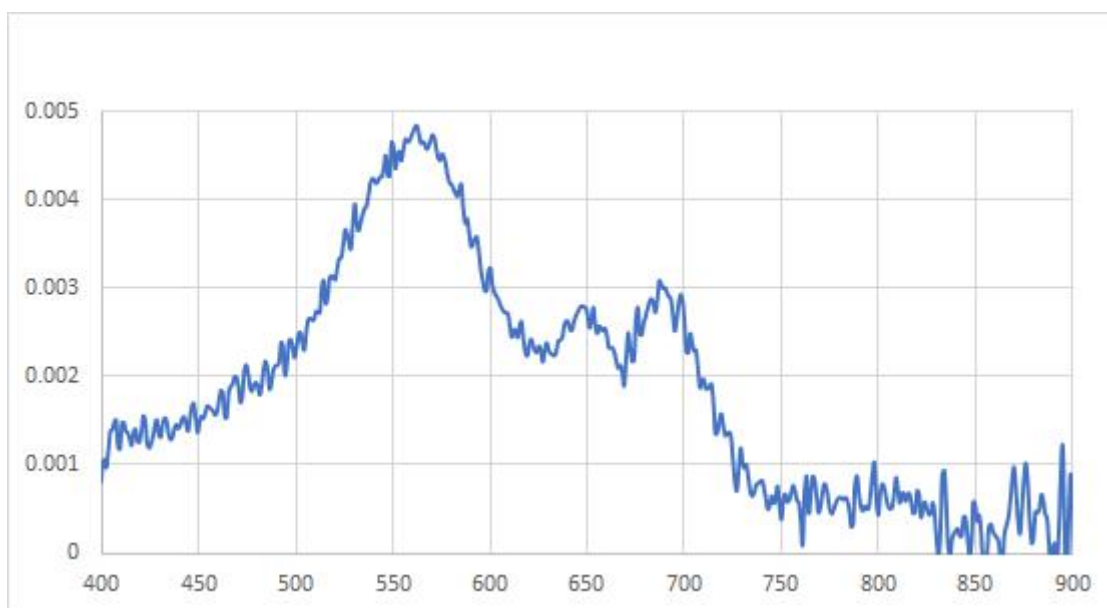


Figura 21 – Espectro de Reflectância (R_{rs}).

Após obtenção da curva de reflectância, os espectros de reflectância foram filtrados e normalizados. A filtragem removeu os espectros que possuíam valores negativos no intervalo de comprimento de onda de 400 a 900 nm. Além da remoção dos espectros com valores negativos, a filtragem também suavizou as curvas de reflectância por meio do cálculo da média móvel utilizando uma janela de 9 nm.

A normalização dos espectros de reflectância consistiu em dividir os valores de R_{rs} em cada comprimento de onda pela área compreendida entre o eixo das abscissas e a curva espectral da R_{rs} (regra do trapézio). Esse procedimento não altera a forma da curva espectral e preserva a assinatura espectral das substâncias opticamente ativas que impactam o valor da reflectância (VANTREPOTTE *et al.*, 2015). O procedimento de normalização permite que as curvas sejam melhor classificadas no processo de classificação proposto adiante (Método 'Ward').

As curvas de reflectância foram normalizadas pelo valor total da área sobre a curva (regra dos trapézios), que será mais bem explicado no capítulo dos resultados, na figura 26.

V.5 Classificação das Curvas Espectrais pelo Método Ward

A classificação dos espectros de R_{rs} tem por objetivo separar as diferentes assinaturas espectrais contidas nos espectros de reflectância. Basicamente, os espectros de R_{rs} contém assinaturas das principais substâncias opticamente ativas presentes na água do mar: fitoplâncton (clorofila-*a*), material dissolvido (CDOM) e material particulado em suspensão. Como as águas da Baía de Guanabara são altamente eutrofizadas, a classificação espectral pode, de certa forma, agrupar amostras radiométricas com diferentes níveis tróficos e, assim, permitir a elaboração dos algoritmos bio-ópticos em função dos grupos de classificação gerados.

O processo de classificação das curvas espectrais de R_{rs} foi realizado utilizando o software Python e o método de classificação desenvolvido por Ward (1963), implementado no módulo *Scikit-Learn* do Python.

Basicamente, no método 'Ward', também denominado de "Mínima Variância" (MINGOTI, 2005), a formação dos grupos se dá pela maximização da homogeneidade dentro dos grupos através de um agrupamento hierárquico no qual a medida de similaridade usada para juntar os grupos é calculada como a soma de quadrados entre os dois agrupamentos feita sobre todas as variáveis (SEIDEL *et al.*, 2008).

Esse método tende a resultar em agrupamentos de tamanhos aproximadamente iguais devido a sua minimização de variação interna (SEIDEL *et al.*, 2008). Para que o agrupamento forme grupos de maneira a atingir o menor erro interno possível, o método busca o mínimo desvio padrão entre os dados de cada grupo (DUTRA *et al.*, 2015).

DONI (2004) definiu algumas das características principais desse método:

- Apresenta bons resultados tanto para distâncias euclidianas quanto para outras distâncias;

- Pode apresentar resultados insatisfatórios quando o número de elementos em cada grupo é praticamente igual;
- Tem tendência a combinar grupos com poucos elementos;
- Sensível à presença de “pontos fora da curva”.

V.6 Implementação dos Algoritmos Empíricos

A partir de dados radiométricos coletados *in situ*, várias combinações de razão de bandas sugeridas pela literatura (OLIVEIRA *et al.*, 2016) e implementadas no presente trabalho foram testadas. A descrição dos algoritmos utilizados é exposta a seguir.

V.6.1 Modelos OC3 e OC4

Os tradicionais algoritmos OC3 e OC4 fazem uso das bandas no azul e verde para estimativas globais da concentração de clorofila (O'REILLY *et al.*, 2000). Devido à significativa contribuição do CDOM e das partículas não algais (*non-algal particles – NAP*) na região espectral do azul, os algoritmos tendem a superestimar a Chl-a em águas do Caso 2. Para verificar a variabilidade das razões de bandas em função da concentração de Chl-a, as seguintes relações foram utilizadas:

$$OC3 = \frac{\max[R_{rs}(442), R_{rs}(489)]}{R_{rs}(559)} \quad (5.6.1)$$

$$OC4 = \frac{\max[R_{rs}(442), R_{rs}(489), R_{rs}(559)]}{R_{rs}(559)} \quad (5.6.2)$$

V.6.2 Modelo Fluorescence Line Height (FLH)

Indicados para estimativa de biomassa em águas com elevada concentração de fitoplâncton ($> 0.5 \text{ mg.m}^{-3}$), o FLH consiste em medir a altura do pico de fluorescência da clorofila, centrado em 680 nm, com base em uma linha interpolada entre os comprimentos de onda 665 e 708 nm (GOWER *et al.*, 1999, 2005):

$$FLH = R_{rs}(680) - \left[R_{rs}(665) + ((R_{rs}(708) - R_{rs}(665)) * \frac{(680-665)}{(708-665)}) \right] \quad (5.6.3)$$

V.6.3 Modelo NIR-red (Nr)

O modelo *NIR-red* é elaborado em função da relação estabelecida entre a R_{rs} e as propriedades ópticas da água (DALL'OLMO & GITELSON, 2005). Utilizando bandas espectrais estrategicamente posicionadas, o modelo busca minimizar, a níveis negligenciáveis, as contribuições dos constituintes diferentes da Chl-*a* para a absorção e minimizar o retro espalhamento do material particulado em suspensão, maximizando a sensibilidade do modelo à variação da Chl-*a*. O modelo *NIR-red* é destinado a águas turvas com concentrações de Chl-*a* superiores a 5 mg.m⁻³ (MOSES *et al.*, 2012). Maiores detalhes das relações estabelecidas nos modelos *NIR-red* estão presentes em publicações científicas (DALL'OLMO & GITELSON, 2005; DALL'OLMO *et al.*, 2005; GITELSON *et al.*, 2008).

Variações do modelo *NIR-red* são implementados nesse trabalho para as bandas espectrais do sensor MERIS (LE *et al.*, 2013; MOSES *et al.*, 2012; GITELSON *et al.*, 2008):

$$Nr1 = \frac{R_{rs}(708)}{R_{rs}(665)} \quad (5.6.4)$$

$$Nr1_OLCI = \frac{R_{rs}(665) + R_{rs}(673)}{R_{rs}(681) + R_{rs}(708)} \quad (5.6.5)$$

$$Nr1_IR = \frac{R_{rs}(708)}{R_{rs}(753)} \quad (5.6.6)$$

$$Nr1_X = \frac{R_{rs}(708) + R_{rs}(681)}{R_{rs}(665)} \quad (5.6.7)$$

$$Nr2 = \left[\frac{1}{R_{rs}(665)} - \frac{1}{R_{rs}(708)} \right] * R_{rs}(753) \quad (5.6.8)$$

$$Nr2_OLCI = [R_{rs}(665) + R_{rs}(673)]^{-1} - [R_{rs}(681) + R_{rs}(708)]^{-1} * R_{rs}(753) \quad (5.6.9)$$

$$Nr2_OLCI1 = [R_{rs}(665)]^{-1} - \max[R_{rs}(708), R_{rs}(681)]^{-1} * R_{rs}(753) \quad (5.6.10)$$

$$Nr2_OLCI2 = [R_{rs}(665)]^{-1} - [R_{rs}(681) + R_{rs}(708)]^{-1} * R_{rs}(753) \quad (5.6.11)$$

$$Nr2_OLCI3 = \frac{[R_{rs}(665) + R_{rs}(673)]}{[R_{rs}(681) + R_{rs}(708) + R_{rs}(753)]} \quad (5.6.12)$$

$$Nr3 = \left[\frac{1}{R_{rs}(665)} - \frac{1}{R_{rs}(680)} \right] * R_{rs}(708) \quad (5.6.13)$$

$$Nr4 = \frac{[R_{rs}(665)^{-1} - R_{rs}(680)^{-1}]}{[R_{rs}(708)^{-1} - R_{rs}(680)^{-1}]} \quad (5.6.14)$$

$$Nr_OLCI1 = \frac{\max[R_{rs}(680), R_{rs}(708)]}{\min[R_{rs}(665), R_{rs}(673)]} \quad (5.6.15)$$

$$Nr_BAND4_Le = \frac{[R_{rs}(665)^{-1} - R_{rs}(673)^{-1}]}{[R_{rs}(753)^{-1} - R_{rs}(708)^{-1}]} \quad (5.6.16)$$

V.6.4 Modelo Red-Green (RG)

O modelo *Red-Green* faz uso das bandas vermelha e verde para derivar a *Chl-a* (GALLEGOS *et al.*, 1990; GITELSON, 1992; DOERFFER & SCHILLER, 2007; LE *et al.*, 2013; IOANNOU *et al.*, 2014). No modelo RG realizado, foi incluída a banda centrada em 708nm.

$$RG1 = \frac{\max[R_{rs}(680), R_{rs}(708)]}{R_{rs}(560)} \quad (5.6.17)$$

V.6.5 Modelo Asynthetic chlorophyll index (SCI)

O algoritmo SCI foi elaborado para extrair informações de clorofila e para minimizar a influência do material em suspensão no espectro de reflectância de sensoriamento remoto (SHEN *et al.*, 2010). Uma variação do modelo SCI explora as bandas do infravermelho do espectro eletromagnético (ZHANG *et al.*, 2015).

$$SCI_Hchl = R_{rs}(680) + \left[\frac{(680-665)}{(680-620)} \right] * [(R_{rs}(620) - R_{rs}(680))] - R_{rs} \quad (5.6.18)$$

$$SCI_Hdelta = R_{rs}(620) - [R_{rs}(680) + \left[\frac{(680-620)}{(680-560)} \right] * [(R_{rs}(560) - R_{rs}(680))]] \quad (5.6.19)$$

$$SCI_Shen = SCI_Hchl - SCI_Hdelta \quad (5.6.20)$$

$$SCI_Hchl = [R_{rs}(708) + \frac{(708-673)}{(708-640)} * (R_{rs}(640) - R_{rs}(708))] - R_{rs}(673) \quad (5.6.21)$$

$$SCI_Hdelta = R_{rs}(640) - [R_{rs}(708) + \frac{(708-640)}{(708-560)} * (R_{rs}(560) - R_{rs}(708))] \quad (5.6.22)$$

$$SCI_Zhang = SCI_Hchl - SCI_Hdelta \quad (5.6.23)$$

V.6.6 Modelo NDCI

O modelo NDCI foi desenvolvido tomando a diferença de banda espectral em 708 nm e 665 nm e normalizando pela soma de sua reflectância para eliminar quaisquer incertezas na estimativa de R_{rs} , tais como: diferenças azimutais ou sazonais e contribuições atmosféricas naqueles comprimentos de onda (MISHRA & MISHRA, 2012). NDCI é formulado como:

$$NDCI = \frac{R_{rs}(708) - R_{rs}(680)}{R_{rs}(708) + R_{rs}(680)} \quad (5.4.24)$$

$$NDCI_1 = \frac{R_{rs}(680) - R_{rs}(665)}{R_{rs}(680) + R_{rs}(665)} \quad (5.4.25)$$

V.6.7 Modelo Maximum Chlorophyll Index (MCI)

Quando a concentração de clorofila aumenta significativamente, parte do sinal de fluorescência em 680 nm é impactado pela ampliação da banda de absorção da clorofila em 670 nm. Nesse caso, o espectro de reflectância apresenta pico máximo próximo a 705 nm e mínimos em 665 e 680 nm. O MCI faz uso dessas feições e é recomendado para concentrações elevadas de clorofila, superior a 30 mg.m⁻³ (GOWER *et al.*, 2005, 2008a). Este algoritmo faz uso do pico de fluorescência próximo a 705 nm no espectro de radiação da luz refletida a partir da superfície do mar (GOWER *et al.*, 2008b).

$$\text{MCI}_{\text{Gower}} = R_{rs}(708) - R_{rs}(680) - \frac{(708-680)}{(753-680)} * (R_{rs}(753) - R_{rs}(680)) \quad (5.6.26)$$

As correlações estabelecidas entre os dados biogeoquímicos e os dados radiométricos coletados *in situ* permitiram avaliar o desempenho dos algoritmos propostos, conforme os resultados.

VI. Resultados e Discussão

VI.1 - Parâmetros Biogeoquímicos Coletados *In Situ*

Em um total de 98 amostras de Chl-a (período: 2012-2017), a concentração média de clorofila-a foi de $63,5 \text{ mg.m}^{-3}$ e os valores mínimos e máximos foram de $1,0$ e $556,0 \text{ mg.m}^{-3}$. Para o período de verão ($n=44$) e inverno ($n=54$) as médias foram de $86,9$ e $44,5 \text{ mg.m}^{-3}$, respectivamente.

Para efeito de comparação, durante o período de 2002-2012 (570 amostras) e considerando uma malha similar de pontos de coleta, Oliveira *et al.* (2016) observaram valores médio, mínimo e máximo de Chl-a de $65,1$, $1,0$, $974,0 \text{ mg.m}^{-3}$. As médias para estação de verão e inverno foram de $80,5$ e $52,4 \text{ mg.m}^{-3}$, respectivamente (OLIVEIRA *et al.*, 2016). Não muito diferente do observado no presente trabalho.

As concentrações de Chl-a na BG revelam uma sazonalidade bem marcada, com o período de verão caracterizado pelas maiores concentrações e o período de inverno, as menores concentrações, como pode ser observado no histograma das concentrações de clorofila-a (Fig. 22).

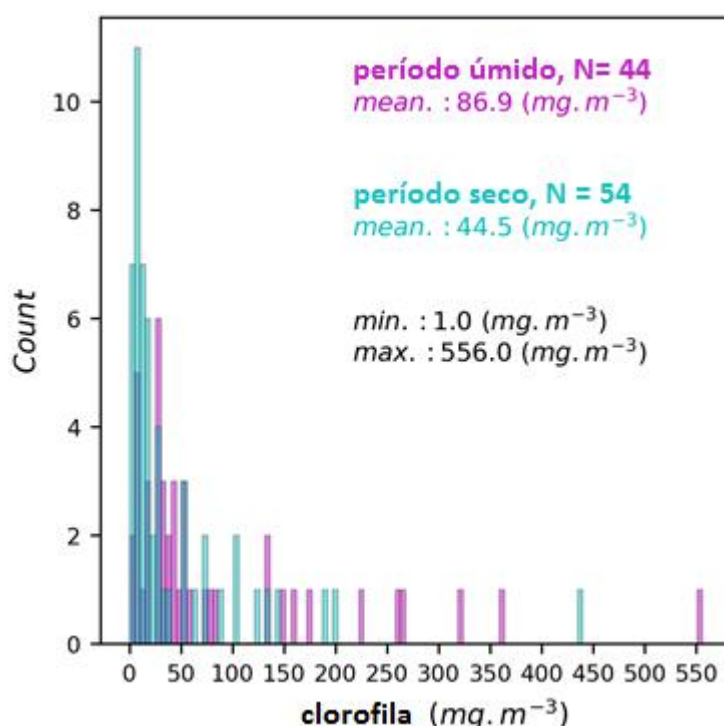


Figura 22 – Histograma da Concentração de Clorofila-a.

O período de verão tem intensa insolação, maior entrada de nutrientes da descarga de rios (não disponível) e gradientes de temperatura e salinidade mais fortes devido à estratificação mais proeminente da coluna de água, condições estas favoráveis à floração fitoplanctônica. A intrusão da ACAS, predominantemente na estação de primavera e verão, é outro fator que acentua a extratificação da coluna da água na BG e impacta a proliferação fitoplanctônica na BG de maneira ainda não muito bem compreendida (OLIVEIRA *et al.*, 2013).

Entretanto, devido ao alto grau de eutrofização da BG, mesmo durante o período de inverno, é possível observar valores elevados de concentração de clorofila-a ($> 50 \text{ mg.m}^{-3}$) nas regiões marginais, principalmente nos pontos BG-34 e PQ (Fig. 18).

Estudos pretéritos mostram que na BG as concentrações de clorofila-a podem chegar a aproximadamente 1000 mg.m^{-3} (OLIVEIRA *et al.*, 2016). No entanto, esses valores extremos são encontrados principalmente nas regiões marginais da BG e são menos frequentes.

Considerados separadamente, os seis pontos de coleta evidenciam a variabilidade espacial das concentrações de Chl-a. Nos pontos UR e BG-01 (Fig. 23 a, b), localizados próximos à desembocadura da BG (Fig. 18), os valores são geralmente inferiores a 50 mg.m^{-3} . No ponto BG-07, localizado no canal central de circulação da BG (Fig. 18), região fortemente impactada pela maré e pelos processos de mistura que aí se estabelecem, as concentrações são relativamente elevadas (Fig. 23c), chegando a $69,5 \text{ mg.m}^{-3}$, porém inferiores aos valores encontrados nas regiões marginais da BG.

Nos pontos PQ e BG-34 (Fig. 23 d, f), localizados nas margens da BG (Fig.18), as concentrações superam 100 mg.m^{-3} . É interessante observar que no ponto BG-34 não há praticamente concentração inferior a 50 mg.m^{-3} ; nessa região há descarga fluvial escoante da sub-bacia hidrográfica da BG que drena uma das áreas mais deterioradas da região metropolitana do Rio de Janeiro (PARANHOS *et al.*, 2001).

No ponto do Caju, localizado no Canal do Caju (Fig.18), devido à vazão fluvial altamente impactado pelos dejetos urbanos e industriais que conferem alta turbidez à água, as concentrações de clorofila-a são relativamente baixas (Fig. 23e). É importante salientar, entretanto, que ao deixar o canal do Caju, as águas poluídas e turvas se misturam com as águas do canal central de circulação da BG, fomentando a proliferação fitoplanctônica.

Esse padrão de fertilização é observado tanto na borda Oeste como na borda Leste da BG devido ao aporte fluvial dos diversos rios que desaguam no interior da BG, geralmente bastante contaminados pelos emissários urbanos e industriais.

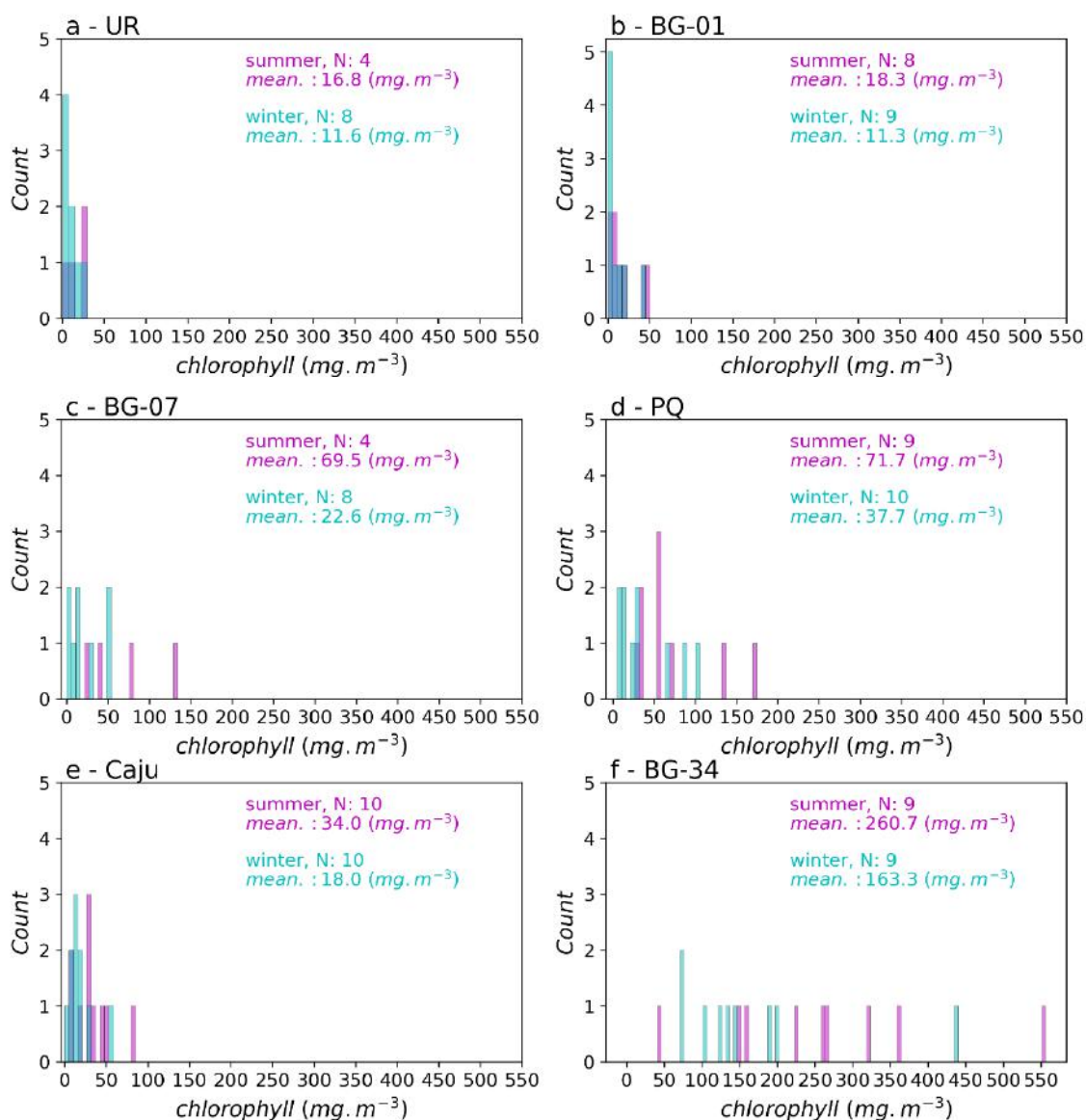


Figura 23 – Histograma da concentração de clorofila-a em cada ponto de coleta.

A temperatura superficial nos pontos de coleta variou de aproximadamente 18 a 30°C, com valor médio de aproximadamente 24°C. Os valores médios de temperatura para cada ponto oscilaram de 22 a 26°C (Fig. 24a). Os pontos que apresentaram a menor e maior temperatura média foram o BG-01 e BG-34, respectivamente (Fig. 24a), evidenciando uma tendência de aquecimento da água nos pontos mais internos da BG. A diferença de temperatura média superficial dos pontos BG-01 e BG-34 é de 4°C. De maneira geral, observa-se uma correlação positiva entre a temperatura e a concentração de clorofila ($\rho = 0,4$).

As profundidades médias do disco de *Secchi* entre os pontos variaram de 0,5 a 3,3 m, com média de 1,5 m. Para uma malha amostral similar aos seis pontos aqui

considerados, Oliveira *et al.* (2016) encontraram uma profundidade média de 1 m para o período de 2002 a 2012.

Os pontos do Caju e BG-34 apresentam o menor valor (0,5 m) para a profundidade média do disco de *Secchi* (Fig24b). Com a supressão do ponto do Caju, a correlação entre a profundidade de *Secchi* e a concentração de clorofila é de -0,6, ressaltando a característica da água da BG ser dominada pela produtividade primária autóctone que, associada à matéria orgânica dissolvida, modula a transparência da água na BG (OLIVEIRA *et al.*, 2016).

No caso do ponto do Caju, não é evidente a correlação entre a profundidade de *Secchi* e a concentração de clorofila-a (Fig. 24b), possivelmente devido à intensa degradação da água que restringe a proliferação fitoplanctônica e à predominância de material particulado em suspensão de origem alóctone que modela a turbidez da água nessa localidade.

De maneira geral, concentrações relativamente baixas de material em suspensão são encontradas nas regiões mais centrais da BG, como é possível inferir a partir do valor relativamente alto da profundidade de *Secchi* dos pontos BG-01 (3,2 m) e BG-07 (1,7 m) (Fig24b).

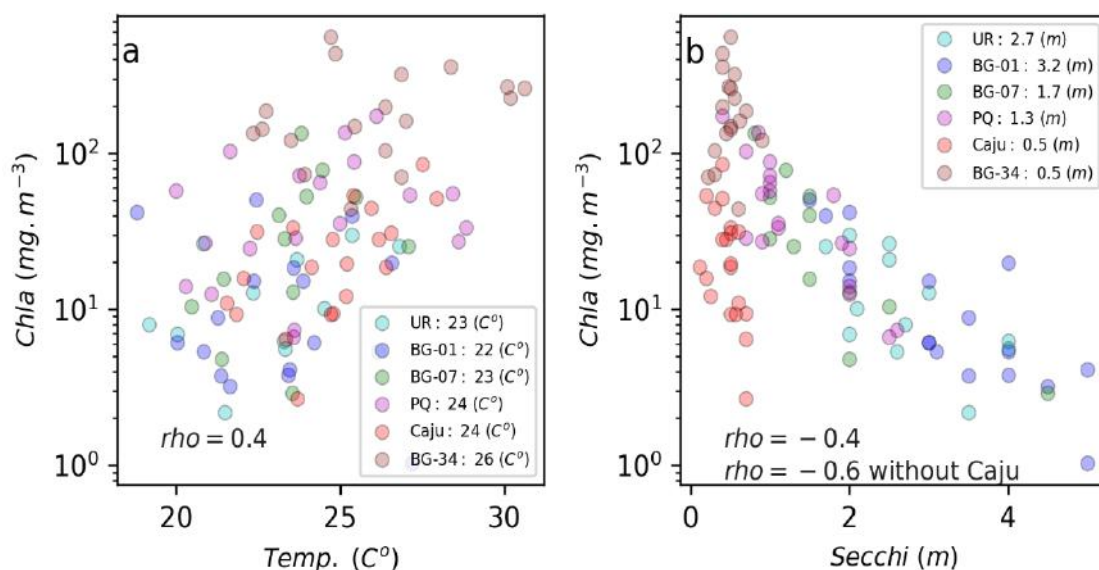


Figura 24 – Gráficos de dispersão da temperatura, profundidade de *Secchi* e concentração de clorofila-a. Na legenda é possível observar os valores médios da temperatura e do *Secchi* para cada um dos pontos amostrais.

VI.2 Tratamento dos Dados de Reflectância de Sensoriamento Remoto

Na figura 25, é possível observar os espectros de reflectância de sensoriamento remoto derivados das medidas radiométricas coletadas *in situ* durante o período de 2012 a 2017. No total, foram processadas 119 medidas radiométricas.

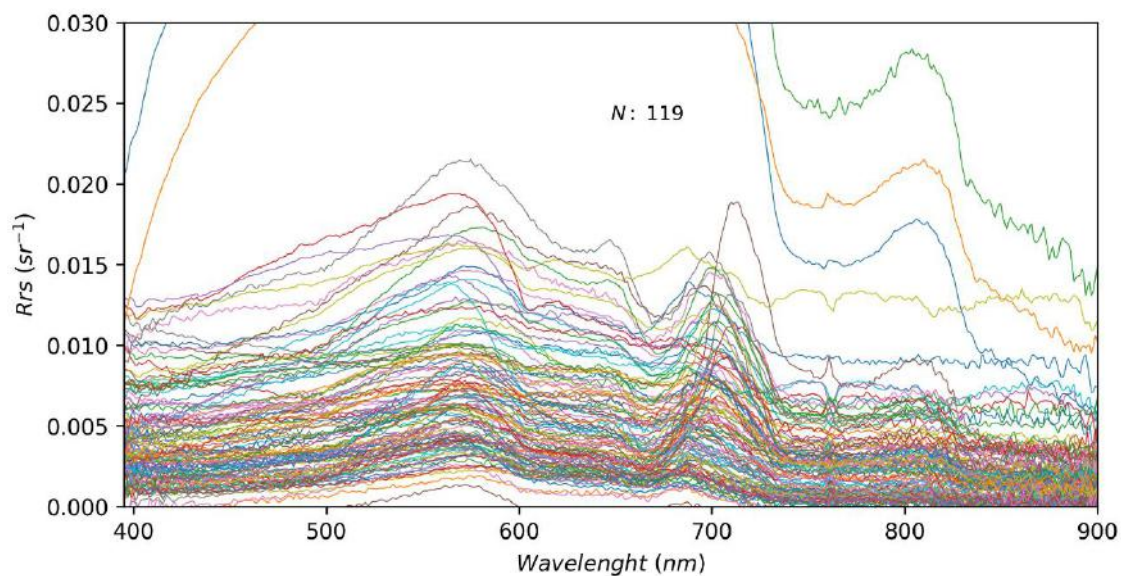


Figura 25 – Reflectância de Sensoriamento Remoto (R_{rs}).

Após a filtragem e normalização das curvas radiométricas, restaram 102 espectros (Fig. 26). A filtragem removeu os espectros que possuíam valores negativos e suavizou as curvas de reflectância.

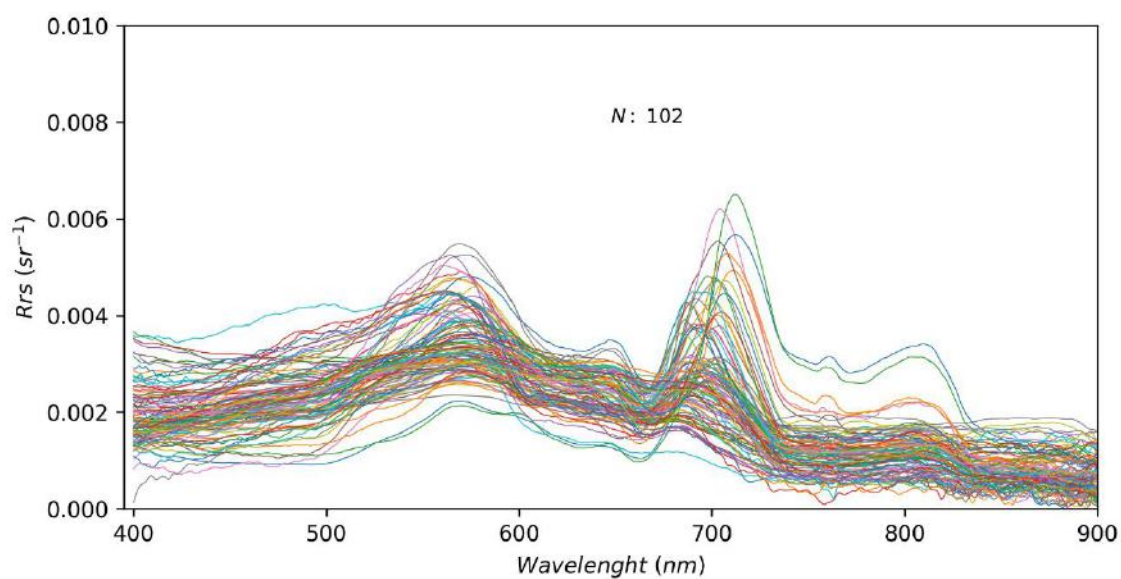


Figura 26 – Reflectância (R_{rs}) filtrada e normalizada.

Por fim, tendo como base as bandas do sensor OLCI a bordo do Sentinel-3, as curvas de reflectância foram reduzidas às bandas do sensor OLCI (Fig. 27). Embora o presente trabalho não tenha feito uso das imagens coletadas pelo sensor OLCI, o número de bandas deste sensor foi explorado na elaboração dos algoritmos empíricos para quantificação da clorofila-*a*.

O sensor OLCI está presente nos dois satélites europeus Sentinel-1 e Sentinel-2 e representa o estado da arte dos sensores de *Ocean Color* que efetivamente coletam informações radiométricas para a quantificação das propriedades ópticas da água do mar; possuem resolução espacial de aproximadamente 300 metros e aquisições diárias ao redor do globo.

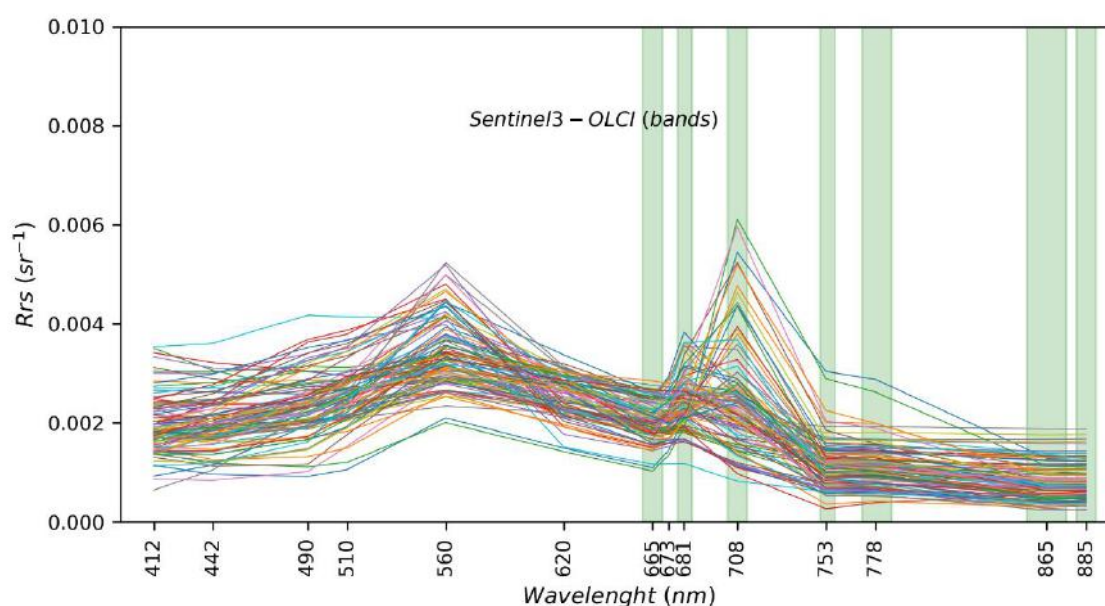


Figura 27 – Reflectância (R_{rs}) filtrada/normalizada e reduzida às bandas do sensor OLCI/Sentinel-3. As barras verdes verticais ressaltam exclusivamente as bandas do OLCI centradas nas regiões espectrais do vermelho e infravermelho próximo.

Na figura 28, observa-se as curvas de reflectância para cada ponto de coleta. De maneira geral, há uma variabilidade de magnitude e de forma entre as curvas pertencentes a um mesmo ponto, exceto o ponto CAJU (Fig. 28d). As curvas coletadas no período de inverno tendem a ter menor valor de reflectância (Fig. 28).

Por sua vez, o ponto CAJU apresentou um comportamento bastante constante no valor da reflectância, mesmo entre o período de verão e inverno. O ponto de coleta no Caju é relativamente abrigado (Fig. 18) e, à despeito do bombeamento da maré, predomina a vazão fluvial e o aporte de resíduos urbanos e industriais, que mantém a qualidade da água superficial a um nível relativamente constante na região de coleta.

Picos de reflectância proeminentes na região espectral de 700 nm são observados nos pontos mais internos BG-07, BG-34 e PQ (Fig. 18), evidenciando a alta produtividade das regiões onde os pontos foram coletados. O pico de fluorescência da clorofila varia sua posição ao longo da curva espectral em função da concentração de clorofila. Se a concentração de clorofila for relativamente baixa ($< 50 \text{ mg.m}^3$), o pico de fluorescência ocorre aproximadamente em 685 nm. Porém, quando as concentrações de clorofila aumentam há um deslocamento desses picos de fluorescência para os comprimentos de onda próximos a 700 nm (GITELSON, 1992).

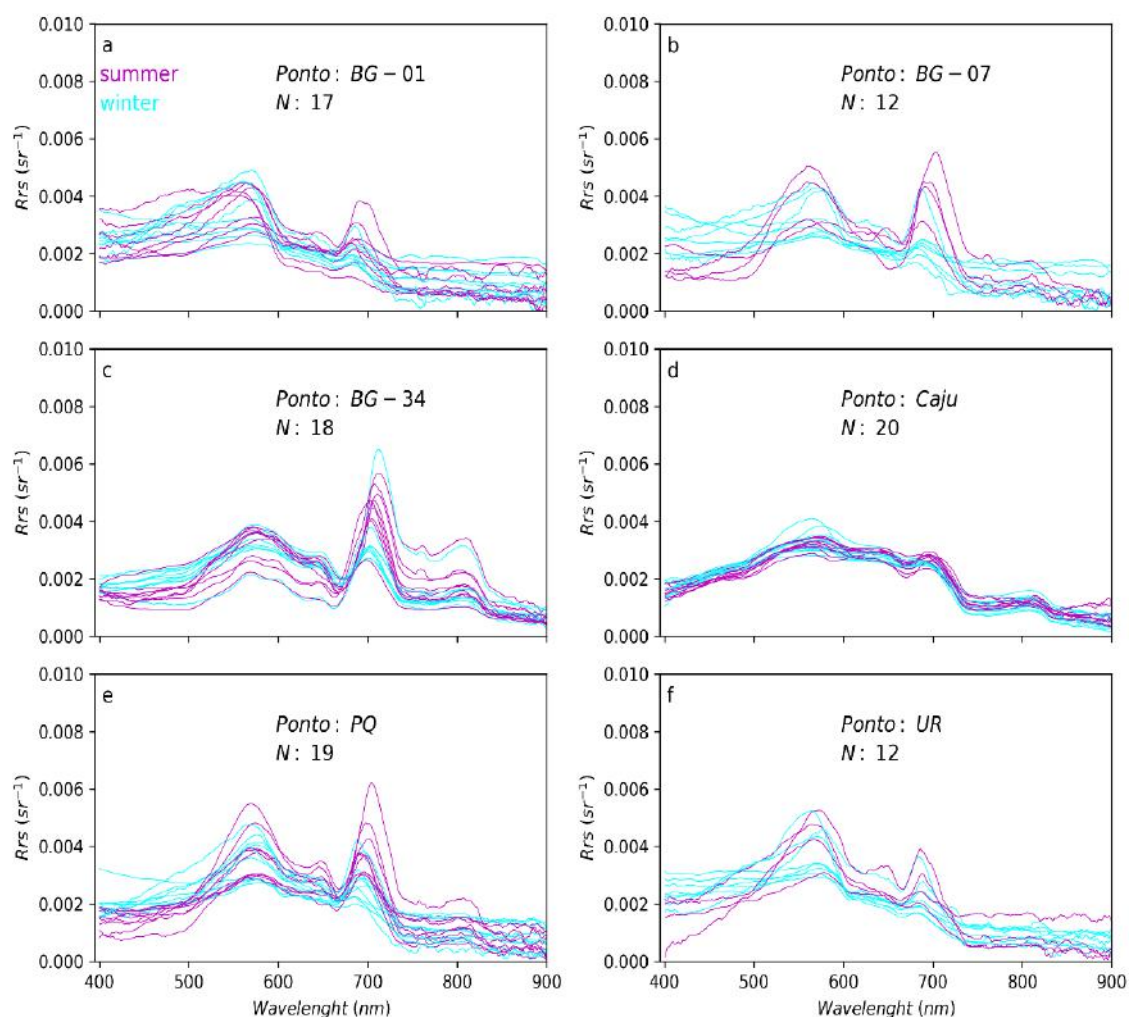


Figura 28 – Reflectância (R_{rs}) filtrada e normalizada para cada ponto de coleta.

VI.3 Classificação das Curvas Espectrais da Reflectância de Sensoriamento Remoto

As curvas de reflectâncias foram agrupadas em classes (ou *clusters*) espectrais utilizando-se o método de classificação Ward (Ward et al., 1963) e uma rotina escrita na linguagem de programação Python (<https://www.python.org/>). Primeiramente,

foram avaliadas em quantas classes as curvas de reflectâncias apresentadas na figura 26 poderiam ser separadas. No gráfico abaixo (Fig.29) é possível observar a média do desvio padrão em função da variabilidade nos números de classes, quanto menor a média do desvio padrão, melhor é a classificação.

Ou seja, foram testadas 19 classes. Observando a figura 29, nota-se que quando o número de classes é igual a 7, a média dos desvios padrão tem o menor valor. Portanto, optou-se por 7 classes para classificar das curvas espectrais.

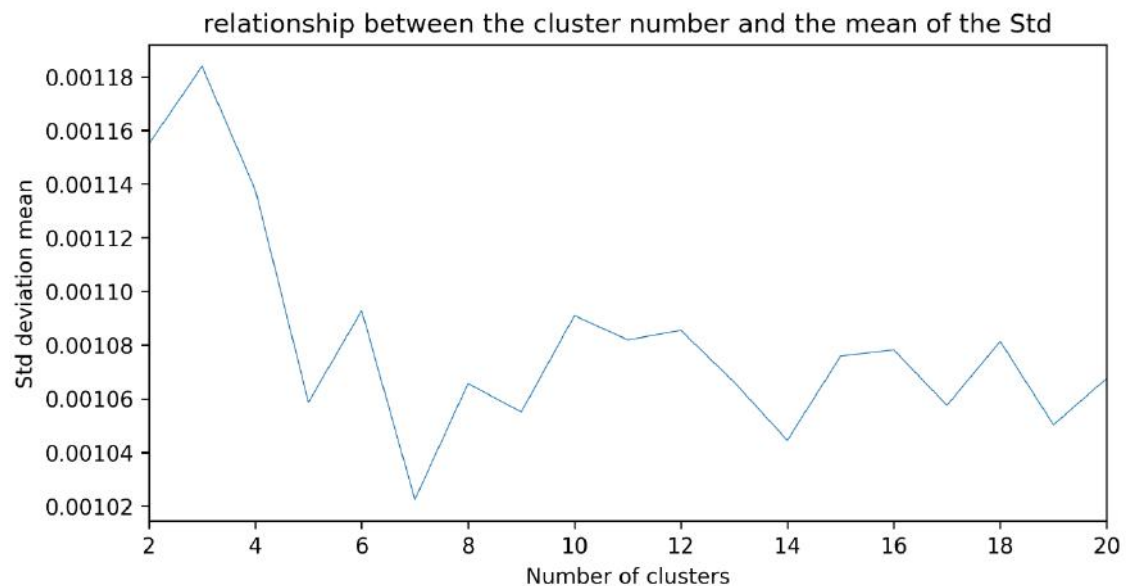


Figura 29 – Avaliação do número de classes (ou clusters) necessário para classificação das curvas espectrais de reflectância de sensoriamento remoto.

As 7 classes podem ser observadas nas figuras 30 (a – g). Na figura 30i, tem-se o centroide das 7 classes, ou seja, a média de cada classe. De maneira geral, as 7 classes evidenciam espectros de R_{rs} característicos de água do Caso 2, dominado pela produtividade primária e material orgânico dissolvido.

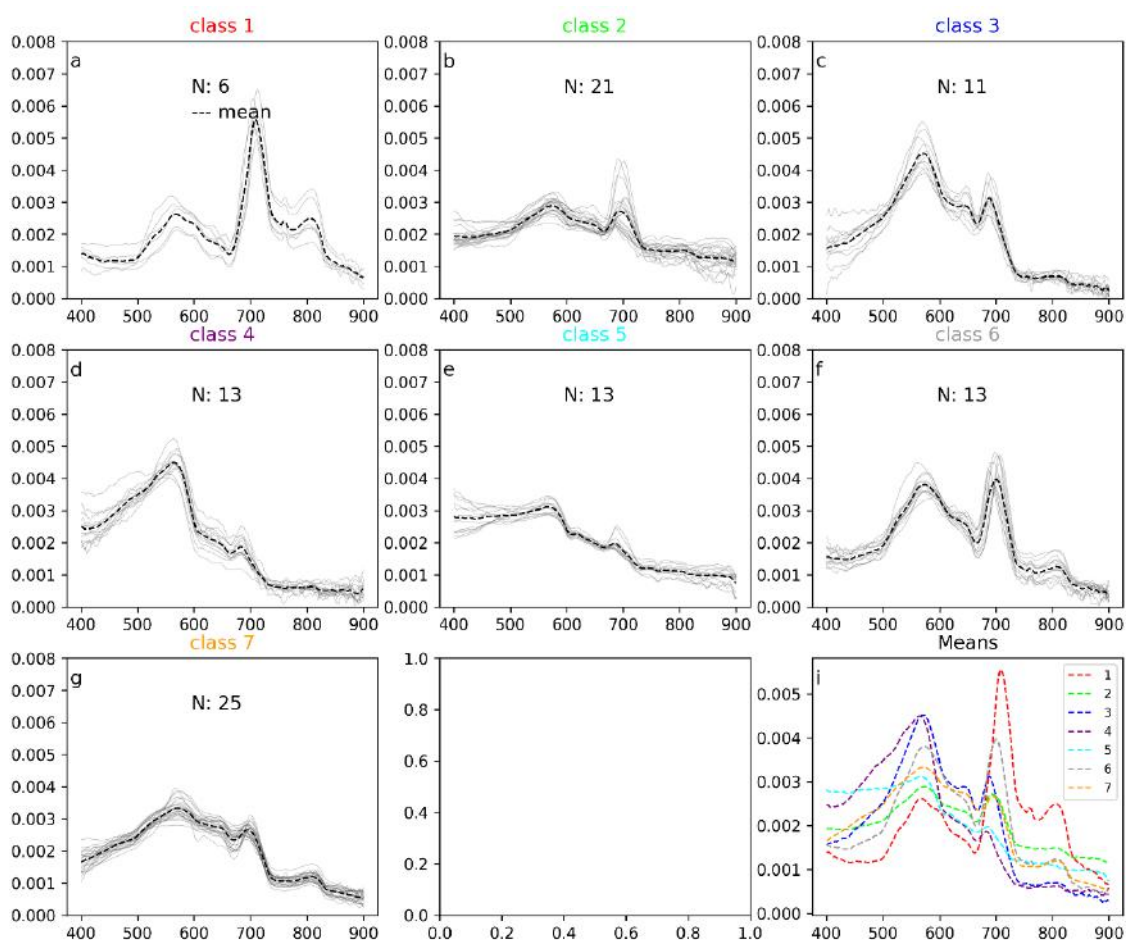


Figura 30 – Classificação das curvas de reflectância de sensoriamento remoto em classes. i = média de cada classe espectral identificada.

A Classe 1 (Fig. 30a) contém os espectros de reflectância com valores de reflectância bastante elevados na região do infravermelho próximo (700 nm a 800 nm). Essa região espectral tem relevância para implementação dos algoritmos bio-ópticos quando as concentrações de clorofila são significativamente elevadas (OLIVEIRA *et al.*, 2016).

Na Classe 6 (Fig. 30f), também se observa o pico de reflectância elevado próximo a 700 nm. Porém, nesta classe, os valores de reflectância próximos a 800 nm não são tão elevados como na Classe 1. Nas demais classes, embora o pico de reflectância esteja presente, ele está localizado em comprimentos de onda inferiores a 700 nm (Fig. 30 b, c, d, e, g).

Quando se observa as médias das classes (Fig. 30i), nota-se que a Classe 1 se destaca tanto pelo pico de reflectância próximo a 700 nm como pelo baixo valor do pico de reflectância localizado próximo a 560 nm. Como o fitoplâncton se comporta

também como se fosse partículas em suspensão, seria esperado que para a Classe 1 o pico de reflectância em 560 nm fosse mais proeminente.

Entretanto, na região da BG, a elevada concentração de material dissolvido (CDOM), associado à produtividade primária autóctone ou oriunda de emissários urbanos, compete pela luz e reduz o sinal que deixa a coluna d'água na região espectral do visível, principalmente nas regiões espectrais do azul e do verde, comprometendo a eficácia dos algoritmos bio-ópticos que fazem uso das bandas do azul e do verde.

Diante disso, parece promissor explorar algoritmos que fazem uso das bandas espectrais centradas exclusivamente na região do infravermelho próximo para estimar as concentrações de clorofila quando o espectro de reflectância estiver associado à Classe 1.

VI.4 Algoritmos Bio-ópticos Empíricos

A partir de várias razões de bandas, gráficos de dispersão entre a concentração de clorofila-a e razões de bandas foram elaboradas a tabela 3 e as figuras 31 e 32. Nestas é possível observar os coeficientes de correlação e os gráficos de dispersão considerando todas as curvas espectrais.

Tabela 3 – Correlações entre as Concentrações de Clorofila-a e os Algoritmos Bio-ópticos.

Algoritmo	Clorofila	Algoritmo	Clorofila
OC3	-0.46	Nr2_OLCI3	-0.83
OC4	-0.50	Nr3	0.82
FLH	-0.84	Nr4	-0.06
Nr1	0.92	Nr-OLCI1	0.91
Nr1_OLCI	-0.85	Nr-BAND4_Le	0.70
Nr1_IR	0.11	RG1	0.86
Nr1_x	0.93	SCI_Shen	0.26
Nr2	0.93	SCI_Zhang	0.82
Nr2_OLCI	0.92	NDCI	0.87
Nr2_OLCI1	0.90	NDCI_1	0.57
Nr2_OLCI2	0.88	MCI_Gower	0.84

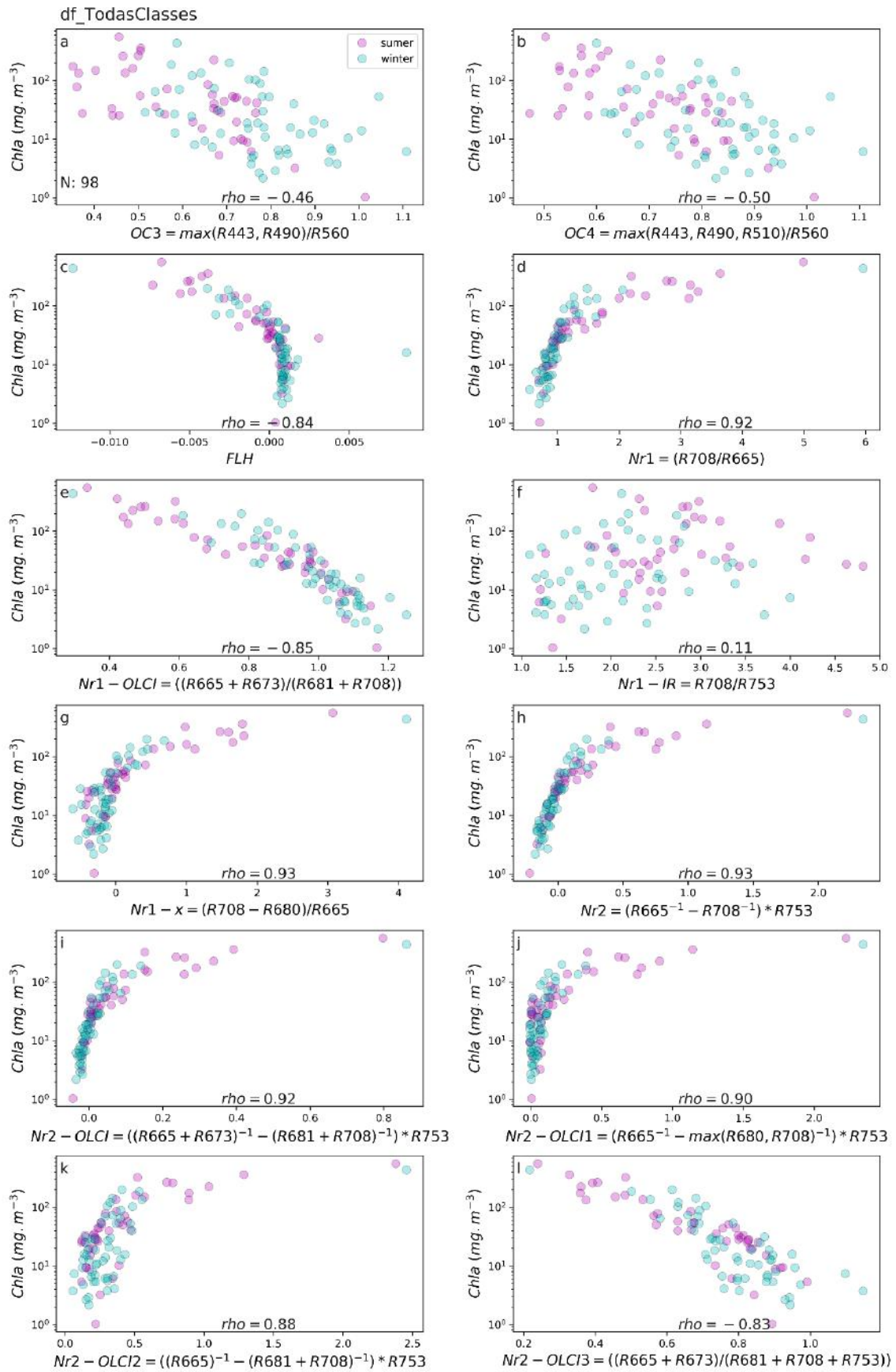


Figura 31 – Gráficos de Dispersão da Clorofila versus Razão de Bandas. São consideradas todas as curvas espectrais.

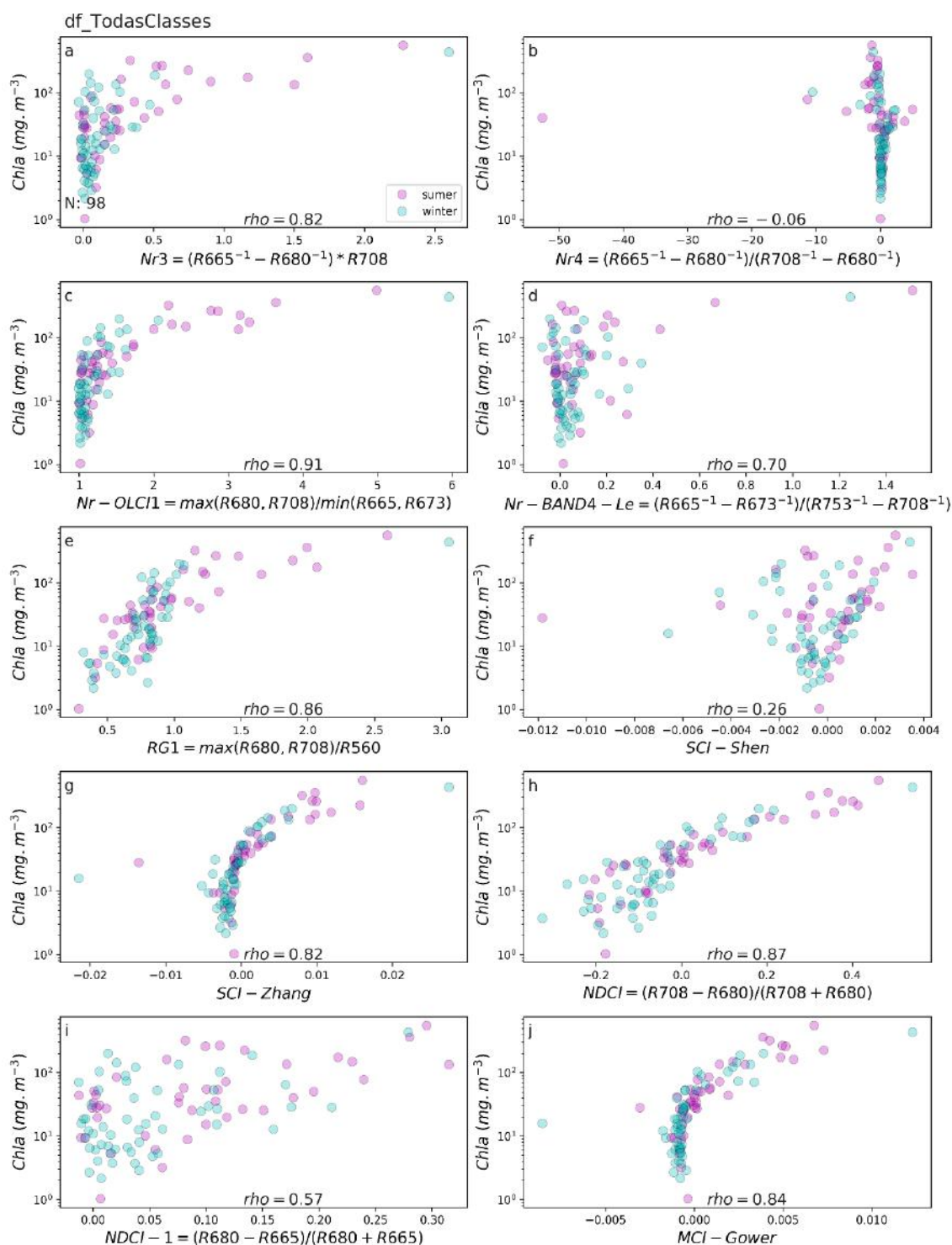


Figura 32 – Gráficos de Dispersão da Clorofila *versus* a Razão de Bandas. São consideradas todas as curvas espectrais.

VI.4.1 Algoritmos OC3 e OC4

A dispersão dos pontos nos gráficos das figuras 31 a, b evidencia a baixa correlação (Tab. 3) entre *Chl-a* e os índices OC3 e OC4. A elevada carga de matéria orgânica dissolvida frequentemente presente na BG faz com que a luz azul seja

primariamente influenciada pelo *CDOM*, inviabilizando a utilização dos algoritmos que fazem uso da razão de bandas azul/verde para estimativa da Chl-a.

VI.4.2 Algoritmo FLH

O algoritmo *FLH* (Fig. 31c) mostra um bom desempenho quando comparado aos tradicionais OC3 e OC4 (Tab. 3), mas perde a sensibilidade para concentrações inferiores a 30 mg.m⁻³.

VI.4.3 Algoritmos Nrs

Entre os algoritmos que fazem uso das bandas vermelho e infravermelho próximo, as melhores correlações (> 0.91) foram obtidas pelos algoritmos Nr1, Nr1-x, Nr2 e Nr2-OLCI (Tab. 3; Fig. 31 d, g, h, i e Fig. 32c, respectivamente). De maneira geral, os algoritmos que fazem uso de razão de bandas centradas na região do vermelho e infravermelho (Fig. 31 d - i e Fig. 32 a - d) tiveram bom desempenho, exceto os algoritmos Nr1-IR e Nr4 (Fig. 31f e Fig. 32b), em acordo com outros estudos que tiveram êxito em águas do Caso 2 com altas concentrações de Chl-a (IOANNOU *et al.*, 2014; LE *et al.*, 2013; MOSES *et al.*, 2012; GIARDINO *et al.*, 2010; DALL'OLMO & GITELSON, 2005).

Particularmente, o algoritmo Nr1-IR (Fig. 31f) será discutido mais adiante, pois faz uso da banda do infravermelho centrada em 753 nm, região espectral que se torna relevante quando as concentrações de clorofila e *CDOM* são elevadas.

VI.4.4 Algoritmo RG1

O algoritmo que faz uso da razão de bandas vermelho/verde (Fig. 32e) apresentou resultado inferior aos algoritmos Nrs citados acima (Tab. 3).

VI.4.5 Algoritmo SCI e NDCI

Dos dois algoritmos SCI, o que apresentou melhor desempenho foi o que fez uso das bandas do vermelho e do infravermelho próximo, o SCI_Zhang (Fig. 32g). O algoritmo SCI_Shen (Fig. 32f) faz uso das bandas espectrais do verde e do vermelho e apresentou pior desempenho.

Dos algoritmos NDCI (Fig. 32 h, i), o que apresentou melhor resultado também foi o que fez uso da banda infravermelho próximo (708 nm), como pode-se observar na figura 32h.

De qualquer forma, ambos os algoritmos SCI e NDCI tiveram resultados inferiores aos algoritmos Nr1, Nr1-x, Nr2 e Nr2-OLCI (Tab. 3; Fig. 31 d, g, h, i e Fig.32c, respectivamente).

VI.4.6 Algoritmo MCI

O algoritmo MCI apresentou resultados satisfatórios para concentrações de clorofila superiores a 10 mg.m^{-3} , mas ainda assim, o resultado não foi tão bom quanto os algoritmos Nr1, Nr1-x, Nr2 e Nr2-OLCI (Tab. 3; Fig. 31 d, g, h, i e Fig.32c, respectivamente).

Os algoritmos que fizeram uso da banda centrada na região espectral de 673 nm, Nr1-OLCI, Nr2-OLCI, Nr2-OLCI3, Nr-OLCI1, Nr-BAND4-Le, vistos nas figuras 31 e, i, l e 34 c, d, respectivamente, não apresentaram resultados superiores ao Nr2 (Fig. 31h). A banda centrada em 673 nm é uma inovação em termos de satélites de Ocean Color e foi implementada recentemente no sensor OLCI, a bordo do satélite Sentinel-3 (Fig. 27). No entanto, é necessário explorar melhor as possibilidades de utilização dessa banda para saber até que ponto ela pode auxiliar nas estimativas de clorofila.

Ao todo, as maiores correlações foram obtidas pelos algoritmos Nr1_x e Nr2 (Tab. 3, Fig. 31 g, h, respectivamente). Ambos os algoritmos fazem uso da banda de fluorescência da clorofila (680 a 708 nm), sendo que o algoritmo Nr2 também utiliza a banda espectral localizada em 753 nm.

Entretanto, nota-se que para concentrações de clorofila abaixo de 100 mg.m^{-3} , o algoritmo Nr1_x apresenta maior dispersão dos dados (Fig. 31g). Por outro lado, o algoritmo Nr2 parece indicar uma tendência de saturação quando as concentrações de clorofila superam 200 mg.m^{-3} (Fig. 31h). Esse efeito “saturação” também pode ser consequência da alta concentração de CDOM na água. Altas concentrações de CDOM podem impactar até mesmo as regiões espectrais do vermelho (LE *et al.*, 2013).

Segundo LE *et al.* (2013), a absorção devido ao CDOM no comprimento de onda de 700 nm não é mais negligenciável quando a absorção do CDOM em 400 nm (banda do azul) é superior a 2 m^{-1} . Ou seja, altas concentrações de CDOM na água do mar absorvem a luz e podem restringir a saída de luz e mascarar o sinal de fluorescência na região espectral do vermelho, fazendo com que os algoritmos que

fazem uso da banda de fluorescência subestimem as concentrações de clorofila em águas com altas concentrações de clorofila e CDOM.

A região espectral de 753 nm responde bem quando as concentrações de clorofila-a são significativamente elevadas, como poderá ser observado mais adiante. Nesse caso, o fitoplâncton promove o aumento dos valores de reflectância nos comprimentos de onda de 753 nm, pois atua como partícula em suspensão na coluna d'água, fortalecendo o retroespalhamento da radiação eletromagnética também nessa região espectral que dificilmente é impactada pela presença do CDOM.

Devido às altas concentrações de CDOM presentes na BG, resultante tanto da alta produtividade primária como do aporte de emissários urbanos e drenagem continental, e na tentativa de minimizar o impacto do CDOM quando as concentrações de clorofila são elevadas, buscou-se trabalhar com os espectros de reflectância que notoriamente revelam altas concentrações de clorofila, como é o caso dos espectros de reflectância da Classe 1 (Fig. 30a).

Vale notar que os espectros de reflectância da Classe 6 também apresentam picos elevados de fluorescência próximo a 700nm (Fig. 30 f, i), indicando elevadas concentrações de clorofila. Porém, na região espectral próxima a 560 nm, o pico de reflectância da Classe 6 é mais proeminente do que o pico observado para os espectros da Classe 1 (Fig. 30i), sugerindo que a Classe 1 é mais impactada pelo CDOM ao longo da região espectral do visível do que a Classe 6.

Em decorrência dessa particularidade observada nos espectros de reflectância da Classe 1, a estratégia adotada foi separar a Classe 1 (Fig. 30a) dos demais espectros de reflectância e obter o gráfico de dispersão para os espectros da Classe 1 e o gráfico de dispersão para as demais classes da figura 30 (classes 2, 3, 4, 5, 6 e 7). Ou seja, todas as classes foram aglutinadas em uma única classe, exceto a Classe 1.

Na figura 33, pode-se observar os gráficos de dispersão entre a concentração de clorofila e os algoritmos Nr2 e Nr1-IR: considerando todas as classes espectrais definidas na figura 30 (Fig. 33 a, b); considerando todas as classes espectrais menos a Classe 1 definida na figura 30a (Fig. 33c,d); considerando apenas a Classe 1 definida na figura 30a (Fig. 33 e, f). Os círculos pontilhados nas figuras 33 a, b destacam as concentrações de clorofila referente aos espectros de reflectância da Classe 1 (Fig. 30a).

Em essência, os resultados expressos na figura 33 mostram que a classificação espectral pode ser um meio eficaz de separar as reflectâncias associadas às elevadas concentrações de clorofila e altas concentrações de CDOM. É interessante observar os pontos referentes às curvas espectrais da Classe 1 (Fig. 30a) nos gráficos de dispersão das figuras 33 a, b (pontos envoltos em círculos

pontilhados). No caso da figura 33a, nota-se uma certa ruptura do padrão de dispersão dos pontos.

Os gráficos de dispersão das Classes 2, 3, 4, 5, 6 e 7 (todas as Classes menos a Classe 1) pode ser observado na Figura 33c. Apesar da diminuição do coeficiente de correlação de 0,93 (Fig. 33a) para 0,90 (Fig. 33c), a curva de regressão possui mais coesão quando a Classe 1 é removida.

É importante mencionar que todos os algoritmos apresentados nas figuras 31 e 32 foram testados novamente com esse novo conjunto de dados (sem a Classe 1), mas ainda assim persistiu o melhor desempenho do algoritmo Nr2.

Observa-se também que o algoritmo Nr1-IR (Fig. 33d) não apresenta bom desempenho com esse novo conjunto de dados (todas as Classes menos a Classe 1). Porém quando somente a Classe 1 é considerada, o algoritmo Nr1-IR (Fig. 33f) tem melhor desempenho do que o algoritmo Nr2 (Fig. 33e).

Diante dos resultados aqui apresentados, é plausível utilizar o processo de classificação espectral para filtrar os espectros de reflectância e selecionar os algoritmos adequados para quantificar as concentrações de clorofila na região da BG.

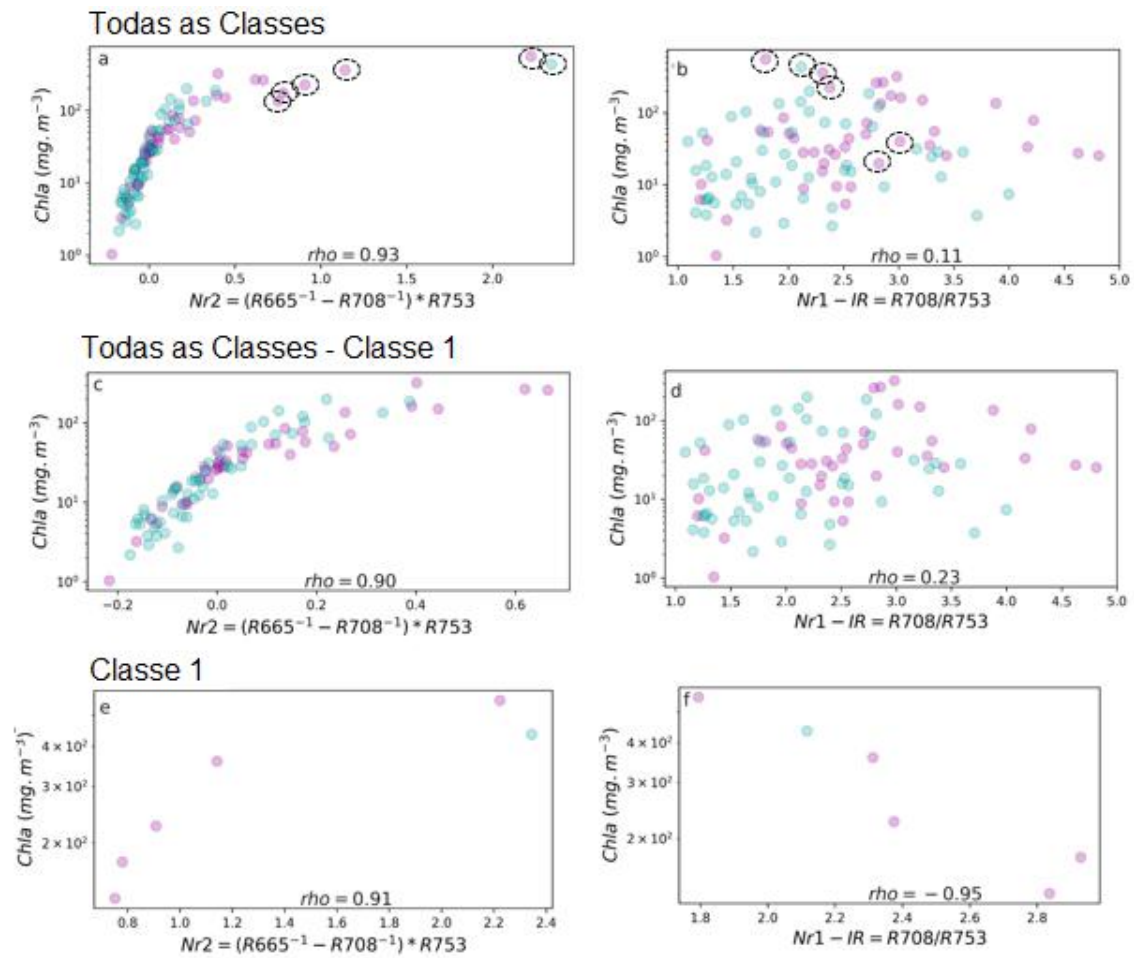


Figura 33 – Gráficos de Dispersão da Clorofila *versus* a Razão de Bandas ($Nr2$ e $Nr1-IR$) considerando todas as classes espectrais (a e b); todas as classes menos a Classe 1 (c e d); a Classe 1 (e e f).

VII. Conclusão

O grau de eutrofização das águas da BG para o período analisado não difere dos observados durante o período de 2002-2012 (OLIVEIRA *et al.*, 2016). As concentrações elevadas de clorofila-a são encontradas frequentemente na porção jusante da BG, próximo às regiões marginais.

O ponto do CAJU, apesar da alta turbidez, apresenta baixas concentrações de clorofila-a, devido ao grau elevado de degradação das águas superficiais dessa localidade.

A temperatura da água superficial da BG possui um gradiente crescente da entrada da Baía em direção jusante.

Nos espectros de reflectância de sensoriamento remoto adquiridos na BG prevalece a assinatura espectral da água do Caso 2, com predomínio de fitoplâncton e matéria orgânica dissolvida.

A classificação espectral das curvas de reflectância pode auxiliar o processo de elaboração dos algoritmos bio-ópticos regionais por meio da identificação dos espectros que possuem assinaturas espectrais associadas à intensa floração fitoplanctônica e elevada concentração de matéria orgânica dissolvida.

Os algoritmos Nr1, Nr1_x, Nr2 e Nr2_OLCI (Eq. 5.6.4, 5.6.7, 5.6.8, 5.6.9 e Tab. 3), que fizeram uso da banda do infravermelho próximo, apresentaram melhor desempenho.

Quando utilizado juntamente com a classificação espectral das curvas de R_{rs} , o algoritmo Nr1-IR (Eq. 5.6.6), que faz uso exclusivamente de bandas centradas na região do infravermelho próximo (708 e 753 nm), pode ser uma opção desejada para quantificar concentrações extremas de clorofila-a e CDOM.

Diante do exposto neste estudo, o algoritmo mais indicado para a região da BG seria o Nr2 já que ele apresentou um coeficiente e correlação alto tanto para as análises com todas as classes, quanto para a análise da classe 1 isolada. Entretanto, outros estudos ainda podem ser feitos para investigar a eficiência deste algoritmo.

Sugestões para Trabalhos Futuros

Para que seja investigado se o melhor parâmetro a ser utilizado em estudos futuros, outras análises podem ser feitas partindo dos resultados deste estudo de caso. Seguem algumas sugestões para otimizar a utilização dos algoritmos já filtrados, como uma forma de aprimorá-los.

Utilizar o classificador 'Ward' nos dados de reflectância coletados pelo sensor OLCI a bordo dos satélites Sentinel-3A e Sentinel-3B para testar o algoritmo de classificação quando aplicado diretamente aos dados radiométricos coletados pelo sensor OLCI.

Aplicar os algoritmos desenvolvidos em imagens do sensor OLCI e validar os resultados com dados adquiridos *in situ* e concomitantes com a passagem do sensor OLCI.

Testar outros tipos de classificação espectral, como o algoritmo OWTs (*Optical Water Types*) que faz uso da lógica fuzzy para classificar os espectros de reflectância (MOORE *et al.*, 2001).

8. Referências Bibliográficas

ALCÂNTARA, E. **Sensoriamento Remoto Hiperespectral**. Apostila de Aula, Departamento de Cartografia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2014.

ALCÂNTARA, E. **Sensoriamento Remoto – Engenharia Ambiental**. Apostila de Aula, Departamento de Cartografia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2016.

BAKKER, H.W.; FERINGA, W.; GIESKE, A. S. M.; GORTE, B. G. H.; GRABMAIER, K. A.; HECKER, C. A.; HORN, J. A.; HUURNEMAN, G. C.; JANSSEN, L. L. F.; KERLE, N.; MEER, F. D.; PARODI, G. N.; POHL, C.; REEVES, C. V.; RUITENBEEK, F. J.; SCHETSELAAR, E. M.; TEMPFLI, K.; WEIR, M. J.C.; WESTINGA, E.; WOLDAI, T. **Principles of Remote Sensing**. The International Institute for GeoInformation Science and Earth Observation (ITC), Enschede. 2009.

BATISTA, G. T.; DIAS, N. W. Introdução ao Sensoriamento Remoto e Processamento de Imagens. **INPE**, volume1, abril, 2005.

BRANDT, F. T. C. 2013. **Notas de aulas de física básica - Ondas, Relatividade, Termodinâmica e Eletromagnetismo**. Universidade de São Paulo - USP. Disponível em: www.politecnicos.com.br/disciplinas/4323203-fisica-iii-poli-usp/pdf/068.pdf

BRICAUD, A.; BEDHOMME, A. L.; MOREL, A. Optical properties of diverse phytoplanktonic species: experimental results and theoretical interpretation. **Journal of Plankton Research**, v. 10, p. 851-873, 1988.

BRICAUD, A; SATHYENDRANATH, S. **Spectral signatures of substances responsible for the change in ocean color**. Signatures Spectrales d'Objectsen Teledetéction, Avignon, Sep, 1981.

BROWN, O. B.; EVANS, R. H.; BROWN, J.W.; GORDON, H. R.; SMITH, R. C.; BAKER, K. S. **Phytoplankton blooming of the U.S.: a satellite description**. Science, Vol. 229, Issue 4709, pp. 163-167, 12 Jul 1985.

BUKATA, R.P.; J.H. JEROME; K.Y. KONDRATYEV AND D.V. POZDNYAKOV. Optical Properties and Remote Sensing of Inland and Coastal Waters. 362p, 1995.

CAMPBELL, I. J.B. Introduction to Remote Sensing, 2 edition, The Guilford Press, New York, 622 pp. **Laboratory Sessions**. 1996.

CCRS Tutorial, *Fundamentals of Remote Sensing*. **Canada Centre for Remote Sensing (CCRS)**, 2016.

CHEN, H. S. **Space remote sensing systems: An introduction**. Orlando Academic Press, Inc., 269 p, 1985.

CIDS. Baía de Guanabara: Dossiê Sócio-Ambiental. In: **Seminário Internacional: Gestão Sustentável da Baía de Guanabara, Rio de Janeiro**. Seminário Internacional: Gestão Sustentável da Baía de Guanabara. Rio de Janeiro: Escola Brasileira de Administração Pública - Fundação Getúlio Vargas (FGV), p. 1-55, 2000.

COSTA, M. A. M. A metrópole e o estuário: pressões exercida pelo Rio de Janeiro na Baía de Guanabara. **III Seminário Nacional sobre o Tratamento de Áreas de Preservação Permanente em Meio Urbano e Restrições Ambientais ao Parcelamento do Solo**. Setembro de 2014.

COSTA, M. A. M. Da lama ao caos: um estuário chamado Baía de Guanabara. **Cad. Metrop.**, São Paulo, v. 17, n. 33, pp. 15-39, maio 2015.

DALL'OLMO, G.; GITELSON, A. A. Effect of bio-optical parameter variability on the remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters: experimental results. **Applied Optics**, 44(3): 412-422, 2005.

DALL'OLMO, G.; GITELSON, A. A.; RUNDQUIST, D. C.; LEAVITT, B.; BARROW, T.; HOLZ, J. C. Assessing the potential of SeaWiFS and MODIS for estimating chlorophyll concentration in turbid productive waters using red and near-infrared bands. **Remote Sensing of Environment**, 96(2), 176–187, 2005.

DI MAIO, A.; RUDORFF, B. F. T.; MORAES, E. C.; PEREIRA, G.; MOREIRA, M. A.; SAUSEN, T. M.; FLORENZANO, T. G. Formação Continuada de Professores - Curso Astronáutica e Ciências do Espaço. **Agência Espacial Brasileira**. 2008.

DOERFFER, R.; SCHILLER, H. The MERIS case 2 water algorithm. **International Journal of Remote Sensing**, 28, 517-535, 2007.

DONI, M. V. **Análise de Cluster: Métodos Hierárquico e de Particionamento**. Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2004.

DUTRA, R. M. O.; SPERANDIO, M.; COELHO, J. 2015. **O Método Ward de Agrupamento de Dados e sua Aplicação em Associação com os Mapas Auto-Organizáveis de Kohonen**. LABPLAN - Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica, UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/265916144>.

ECHER, M. P. S.; MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B. A importância dos dados de cobertura de nuvens e de sua variabilidade: Metodologias para aquisição dedados. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol. 28, n. 3, são Paulo, 2006.

ELACHI, C. **Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing**, New York, Wiley, 1987.

FEEMA. **Qualidade de Água da Baía de Guanabara (1990/1997)**. In: Programa de Despoluição da Baía de Guanabara/Programas Ambientais Complementares. Rio de Janeiro, vol. 1, p.57 – 94, 1998.

FISTAROL, G. O.; COUTINHO, F. H.; MOREIRA, A. P. B.; VENAS, T.; CÁNOVAS, A.; DE PAULA, S. E. M.; COUTINHO, R.; DE MOURA, R. L.; VALENTIN, J. L.; TENENBAUM, D. R.; PARANHOS, R.; DO VALLE, R. A. B.; VICENTE, A. C. P.; AMADO-FILHO, G. M.; PEREIRA, R. C.; KRUGER, R.; REZENDE, C. E.; THOMPSON, C. C.; SALOMON, P. S.; THOMPSON, F. L. Environmental and sanitary conditions of Guanabara bay, Rio de Janeiro. **Frontiers in Microbiology**, v. 6, p. 1-17, 2015.

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em Sensoriamento Remoto**. 3ª edição, ed.: Oficina de Textos. 2011.

GALLEGOS, C.L.; CORRELL, D.L.; PIERCE, J.W. Modeling spectral diffuse attenuation, absorption, and scattering coefficients in a turbid estuary. **Limnology and Oceanography**, 35, 1486-1502, 1990.

GEOBRASIL. **O estado das atividades nos ambientes marinhos e costeiros**. In: O estado do meio ambiente no Brasil. Páginas 118 – 131, 2002.

GIARDINO, C.; BRESCIANI, M.; PILKAITYTE, R.; BARTOLI, M.; RAZINKOVAS, A. In situ measurements and satellite remote sensing of case 2 waters: first results from the curonian Lagoon. **Oceanologia**, 52 (2), pp.197-210, 2010.

GITELSON, A. The peak near 700 nm on radiance spectra of algae and water: relationships of its magnitude and position with chlorophyll concentration. **Int. J. Remote Sensing**, vol. 13, no. 17, 3367-3373, 1992.

GITELSON, A.; DALL'OLMO, G.; MOSES, W. M.; RUNDQUIST, D. C.; BARROW, T.; FISHER, T. R., *et al.* A simple semi-analytical model for remote estimation of chlorophyll-a in turbid waters: Validation. **Remote Sensing of Environment**, 112(9), 3582–3593, 2008.

Google Maps. 2017. Disponível em <www.googlemaps.com> Acesso em: 02 de novembro de 2017.

Google Images. 2017. Disponível em <www.googleimages.com> Acesso em: 25 de novembro de 2017.

GORDON H. R.; MOREL, A. Y. **Remote assessment of ocean color for interpretation of satellite visible imagery**: a review. New York: Springer-Verlag, 1983

GOWER, J. F. R.; DOERFER, R.; BOSTARD, G.A. Interpretation of the 685 nm peak in water-leaving radiance in terms of fluorescence, absorption and scattering, and its observation by MERIS. **International Journal of Remote Sensing**, 0, 1771-1786, 1999.

GOWER, J.; KING, S.; BOSTARD, W.Y.G.; BROWN, L. The use of the 709 nm band of MERIS to detect intense plankton blooms and other conditions in coastal waters. **Fisheries and Ocean**, Canada, Institute of Ocean Sciences, 2005.

GOWER, J.; KING, S.; GONCALVES, P. Global monitoring of plankton blooms using MERIS MCI. **International Journal of Remote Sensing**, pages 6209-6216, Oct 2008a.

GOWER, J.; KING, S.; BORSTAD, G.; BROWN, L. The importance of a band at 709 nm for interpreting water-leaving spectral radiance. **Canadian Journal of Remote Sensing**. 34(3): 287- 295, 2008b.

<http://www.oeco.org.br/blogs/geonoticias>. Acesso em: 24 de dezembro de 2017.

<https://www.infoescola.com/fisica/espectro-eletromagnetico/>. Acesso em: 24 de dezembro de 2017.

<http://www.seos-project.eu/modules/laser-rs/laser-rs-c03-s03-p01.html>. Acesso em: 24 de dezembro de 2017.

<http://ksuweb.kennesaw.edu/~jdirnber/BioOceanography/Lectures/LecPhysicalOcean/LecPhysicalOcean.html>. Acesso em: 24 de dezembro de 2017.

IOANNOU, I.; GILERSON, A.; ONDRUSEK, M.; FOSTER, R.; EL-HABASHI, A.; BASTANIAND, A.K. S. Algorithms for the remote estimation of chlorophyll-a in the Chesapeake Bay, *Proceedings SPIE*, 9111, **Ocean Sensing and Monitoring**, VI, 911118, 2014.

IOCCG. Remote sensing of ocean colour in coastal, and other optically complex waters. In S. Sathyendranath (Ed.), Technical report. **Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group**, 3, Dartmouth, Canada: IOCCG, 2000.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres**. Tradução da segunda edição. São Paulo, Brasil 2009.

KAMPEL, M.; GAETA, S. A.; LORENZETI, J. A.; POMPEU, M. Estimativa por satélite da concentração de clorofila a superficial na costa sudeste brasileira, região oeste do Atlântico Sul: Comparação dos algoritmos SeaWiFS. **Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR)**, Goiânia, Brasil, INPE, p.3633-3641, abril, 2005.

KAMPEL, M.; GAETA, S. A.; POMPEU, M.; LORENZZETTI, J. A.; RUDORFF, F. M.; FROUIN, R.J. Bio-optical variability in coastal waters of southeast Brazil. **Coastal Ocean Remote Sensing**, Proceedings of SPIE, Vol. 6680, p.1 - 8, 2007.

KIRK, J. T. O., **Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems**. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.

KJERFVE, B.; RIBEIRO, C.H.A.; DIAS, G.T.M.; FILIPPO, A.M.; QUARESMA, V.S. Oceanographic characteristics of an impacted coastal bay: Baía de Guanabara, Rio de Janeiro, Brazil. **Continental Shelf Research**, v. 17, n. 13, p. 1609-1643, 1997.

Kumar, D. N. 2017. **Remote Sensing: Introduction and Basic Concepts**. Indian Institute of Science (IISc), Bangalore. Disponível em: <http://nptel.ac.in/courses/105108077/module1/lecture1.pdf>

LE, C.; HU, C.; ENGLISH, D.; CANNIZZARO, J.; CHEN, Z; FENG, L.; BOLER, R.; KOVACH, C. Towards a long-term chlorophyll-a data record in a turbid estuary using MODIS observations. **Progress in Oceanography**, 109, 90-103, 2013.

LORENZZETTI, J. A. **Princípios Físicos de Sensoriamento Remoto**. 1ª ed. – São Paulo: Blucher, 2015.

MARINO JUNIOR, E. O Uso do Sensoriamento Remoto Orbital na Pesquisa Socioeconômica. **Revista Científica Eletrônica de Agronomia**, Ano V, Número 10, Dezembro de 2006.

MAYR, M. L., 1998. **Avaliação Ambiental da Baía de Guanabara com o Suporte do Geoprocessamento**. Tese de Doutorado, Instituto de Geografia/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

MAYR, L. M.; TENEMBAUM, D. R.; VILLAC, M.C.; PARANHOS, R.; NOGUEIRA, C.R.; BONECKER, S.L.; BONECKER, A.C.T. Hydrobiological characterization of Guanabara Bay. In Hydrobiological Characterization of Guanabara Bay, Magoon, O.; Neves, C.(ed.). **Coastlines of Brazil**. American Society of Civil Engineers, New York, pp. 124-138, 1989.

MENESES, P.R., ALMEIDA, T. **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Brasília, 2012.

MINGOTI, S. A.; **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada**. Editora UFMG, 2005.

MISHRA, S.; MISHRA, D. Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters. **Remote Sensing of Environment**, v. 117 p. 394-406, February, 2012.

MOBLEY, U. D.; STRAMSKI, D.; BISSETT, W. P.; BOS, E. Optical Modeling of Ocean Waters: Is the Case 1 - Case 2 classification Still Useful? **Oceanography**, v. 17, n. 2, p. 60–67, 2004.

MONTEIRO, A. G. 2003. **Metodologia de Avaliação de Custos Ambientais Provocados por Vazamento de Óleo - O Estudo de Caso do Complexo Reduc-D**. Tese de Doutorado, Programa de Planejamento Energético e Ambiental, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

MOORE, T.S.; CAMPBELL, J.W.; FENG, H. A fuzzy logic classification scheme for selecting and bending satellite ocean color algorithms. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 39, n.8, p. 1764-1776, 2001.

MOREIRA, M. S. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação**. 3 edição, UFV Universidade Federal de Viçosa, 2005.

MOREL, A. Optical modeling of the upper ocean in relation to its biogenous matter content (case 1 water). **Journal of Geophysical Research**, v. 93, p.10749-10768, 1988.

MOREL, A. Y.; PRIEUR, L. Analysis of variations in ocean color. **Limnology and Oceanography**, v. 22, n. 4, p. 709-722, 1977.

MOSES, W. J.; GITELSON, A. A.; BERDNIKOV, S.; SAPRYGIN, S.; POVAZHNYI, V. Operational MERIS-based NIR-red algorithms for estimating chlorophyll-a concentrations in coastal waters - The Azov Sea case study. **Remote Sensing of Environment**, 121, 118–124, 2012.

NASSER, V. L., 2001. **Estudo da qualidade de água na Baía de Guanabara utilizando técnicas de sensoriamento remoto e análise geoestatística**. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações**. 4ª ed. – São Paulo: Blucher, 2010.

NOVO, E. M. L. M.; HANSOM, J.D.; CURRAN, P.J. The effect of viewing geometry and wavelength on the relationship between reflectance and suspended sediment concentration. **International Journal of Remote Sensing**, v. 10, n. 8, p. 1357-1372. 1989.

OLIVEIRA, E.N.; FERNANDES, A.; FILIPPO, A.; PARANHOS, R.; PINTO, F.N. (2013). **Entrada da ACAS na Baía de Guanabara (RJ)**. In: X OMARSAT, Cabo Frio, Rio de Janeiro, Brasil.

OLIVEIRA, E.N.; FERNANDES, A.M.; KAMPEL, M.; CORDEIRO, R.C.; BRANDINI, N.; VINZON, S.B.; GRASSI, R.M.; PINTO, F.N.; FILIPPO, A.M.; PARANHOS, R. Assessment of remotely sensed chlorophyll-a concentration in Guanabara Bay, Brazil. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 10, n. 2, p. 026003-026003, 2016.

O'REILLY, J. E., *et al.* SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses, Part 3. **NASA Tech. Memo.** 11(49),2000-206892, NASA Goddard Space Flight Center, MD, 2000.

PARANHOS, R.; ANDRADE, L.; MENDONÇA-HAGLER, L.C.; PFEIFFER, W.C. Coupling bacterial abundance with production in a polluted tropical coastal

bay. In: Faria, B.M.; Farjalla, V. F.; Esteves, F.A. (ed). Aquatic Microbial Ecology in Brazil. **Serie Oecologia Brasiliensis**, Vol. 9. pp. 117-132, 2001.

PDBG, PROGRAMA DE DESPOLUIÇÃO DA BAÍA DE GUANABARA. **Book PDBG**. Rio de Janeiro: CIBG.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. B.; SENTELHAS, P. C. **Meteorologia Agrícola**. Edição Revista e Ampliada. Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Departamento de Ciências Exatas, Piracicaba, SP, fevereiro, 2007.

PRITCHARD, D. W. 1967. What is an Estuary: Physical Viewpoint. In: **Estuaries**, Lauff, G. H. (editor). American Association for the Advancement of Science (AAAS), publication nº. 83, Washington, DC. Pp 3-5 de 757.

SANTOS, A. R. 2017. **Mundo Geomática - Noções Teóricas e Práticas de Sensoriamento Remoto**. Centro de Ciências Agrárias e Engenharias - CCA, Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). cap. 4. Disponível em: <http://www.mundogeomatica.com.br/Geomaticalleru.htm>

SARAIVA, M. F. O.; SARAIVA, K. S. O.; MÜLLER, A. M. 2010. **Teoria da Radiação**. Instituto de Física - IF, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/~fatima/fis2010/Aula16-132.pdf>

SCHUBEL J.R. 1971. **Classification of estuaries**. In: Estuarine environment: estuaries and estuarine sedimentation. Washington D.C., American Geological Institute. Cap.II, p.2 – 8.

SEIDEL, E. J.; MOREIRA JÚNIOR, F. J.; ANSUJ, A. P.; NOA, M. R. C. Comparação entre o método Ward e o método K-médias no agrupamento de produtores de leite. **Ciência e Natura**, UFSM, 30 (1), p. 7- 15, 2008.

SHEN, F.; ZHOU, Y.; LI, D.; ZHU, W.; SALAMA, M. S. Medium resolution imaging spectrometer (MERIS) estimation of chlorophyll-a concentration in the turbid sediment-laden waters of the Changjiang (Yangtze) Estuary. **International Journal of Remote Sensing**. Volume 31, Issue 17-18, Pages 4635-4650, 28 Sep 2010.

SIMONETTI, D. S.; ULABY, F. T. **Manual of Remote Sensing**. 2ª Ed. Vol. I. Falls Church VA: American Society of Photogrammetry, 1983.

VALERIO, A. M.; KAMPEL, M.; STECH, J. L. Correlação de dados de reflectância de sensoriamento remoto estimados com dados do sensor MODIS e medidas in situ. **Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Curitiba, PR, Brasil, INPE p.5100, 30 de abril a 05 de maio de 2011.

VALÉRIO, L. P., 2013. **Análises e estimativas bio-ópticas de dados da estação Antares-Ubatuba, litoral norte de São Paulo**. Dissertação de Mestrado. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE.

WARD, J. H. Hierarchical grouping to optimize an objective function. **Journal of the American Statistical Association**, v. 58, p. 236 – 244. Mar. 1963.

ZHANG, F. ; LI, J. ; SHEN, Q. ; ZHANG, B. ; WU, C. ; WU, Y. ; WANG, G. ; WANG, S. ; LU, Z. Algorithms and Schemes for Chlorophyll a Estimation by Remote Sensing and Optical Classification for Turbid Lake Taihu, China. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, Volume 8, Issue 1, January 2015.